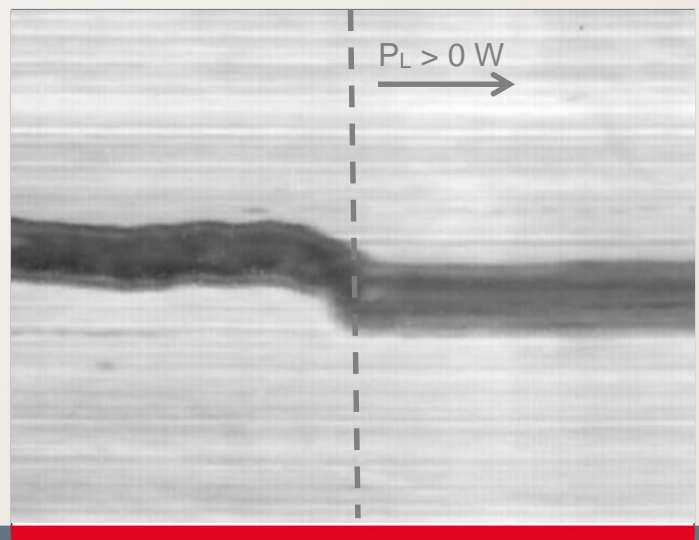


S T R A H L T E C H N I K**B A N D 5 9****Felix Möller**

**Wechselwirkung
zwischen
Lichtbogen und
Laserstrahl
beim Fügen von
Aluminium**



Möller, Felix – Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium

Strahltechnik Band 59, BIAS Verlag, 2016.

Herausgeber der Reihe: F. Vollertsen, R. Bergmann

ISBN 978-3-933762-53-5

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, bleiben vorbehalten.

Kein Teil des Werks darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlags in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

BIAS Verlag, Bremen, 2016

Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation
von
M. Sc. Felix Möller

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Vollertsen (Universität Bremen)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (Technische Universität Ilmenau)

Tag der mündlichen Prüfung: 26. 05. 2016

Möller, Felix:

Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl bei Aluminium

Strahltechnik, Bd. 59, Bremen; BIAS Verlag, 2016. Hrsg.: F. Vollertsen, R. Bergmann

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2016.

ISBN 978-3-933762-53-5

Schlüsselwörter: Hybridverfahren, Fügen, Wechselwirkung

Effiziente und robuste Fügeverfahren stehen im Fokus der Forschung und Entwicklung. Durch kombinatorische Prozesstechnik wie das Laser-Plasma-Hybridfügen kann die Effizienz gegenüber Einzelprozessen deutlich gesteigert werden. Der Grund liegt dabei in einer stabilisierenden Wirkung des Laserstrahls auf den Lichtbogen. In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines coaxialen Laser-Plasma-Prozesses vorgestellt und der Einfluss von unterschiedlichen Aluminiumlegierungen auf den Prozess untersucht. Dabei gilt es, die einzelnen Wechselwirkungszonen wie den Lichtbogen- und den Werkstückbereich getrennt zu untersuchen und so Einflussfaktoren identifizieren zu können.

Interactions between plasma arc and laser beam for aluminum alloys

Keywords: Hybrid process, Brazing, Interactions

Efficiency and robustness of joining processes are in focus of investigations. By using different process technics like laser and arc in combination the efficiency can be increased significantly compared to the single processes. That is based on the stabilizing effect of the laser process to the arc process. This thesis deals with the development of a coaxial laser plasma hybrid working system to investigate the influence of the laser process to the arc process. Therefore, different aluminum alloys with different oxide layers are used. The interaction zones in the arc and on the base material are investigated separately.

Vorwort

Viele der hier vorliegenden Ergebnisse entstanden neben meiner Tätigkeit als Gruppenleiter am BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH. Hier konnte ich die Voraussetzung der notwendigen Unterstützung seitens Kollegen, Freunden, Studenten und Projektpartnern finden, die zum erfolgreichen Abschließen meiner Arbeit beigetragen hat.

Ich möchte einen besonderen Dank Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen, Institutsleiter des BIAS, aussprechen. Seine wissenschaftliche Arbeitsweise und Kreativität haben mich nachhaltig zum Positiven beeinflusst.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. J.P. Bergmann für die Übernahme des Koreferats sowie Prof. Dr.-Ing. S.-F. Goecke für die nicht abreißende Unterstützung.

Einen ganz speziellen Dank möchte ich Peer Woizeschke für seine unermüdliche Bereitschaft zur kritischen und fachlichen Diskussion aussprechen. Durch seine analytischen Fähigkeiten und Hinweise hat er mich insbesondere in der Endphase der Arbeit unterstützt.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen H. Kügler, Dr.-Ing. C. Thomy und T. Radel für die kritische Durchsicht und hilfreichen Anmerkungen.

Abschließend danke ich meiner Familie für das Verständnis und die mentale Unterstützung sowie die Bereitschaft auf gemeinsame Zeit verzichtet zu haben.

Felix Möller

Bremen, Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	iii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	2
2.1 Plasmalichtbogen.....	2
2.1.1 Physik des Lichtbogens	2
2.1.2 Lichtbogenansatz	4
2.2 Laserstrahl	6
2.2.1 Wärmeleitschweißen	6
2.2.2 Tiefschweißen.....	7
2.3 Laser-Lichtbogen-Wechselwirkung	8
2.4 Lichtbogen und Laserstrahl zum Aluminiumlöten.....	15
3 Zielsetzung.....	19
4 Experimentelles	20
4.1 Werkstoffe und Probengeometrie	20
4.2 Koaxiale Beeinflussung	22
4.3 Beidseitige Beeinflussung	23
4.4 Messsysteme	23
4.4.1 Lichtbogenspannungsmessung	23
4.4.2 Hochgeschwindigkeitskinematografie	24
4.4.3 Temperaturmessung.....	24
4.5 Versuchseinrichtung	25
4.5.1 Laserstrahlquelle.....	25
4.5.2 Lichtbogenquelle	26
4.5.3 Ringelektrodenbrenner	26
4.6 Absicherung der Durchführbarkeit.....	28
4.6.1 Schlierenmessung	28
4.6.2 Absorptionsmessung der Laserstrahlung im Plasmalichtbogen	30
4.6.3 Optische Stabilität des Prozesses.....	33

4.7	Versuchsdurchführung.....	35
4.7.1	Beeinflussung der Lichtbogenspannung.....	35
4.7.2	Blindlötungen auf Aluminium.....	37
4.8	Mechanische Beeinflussung	37
5	Ergebnisse	39
5.1	Spannungsmessung.....	39
5.1.1	Beidseitige Materialbearbeitung.....	39
5.1.1.1	Elektrisch negativ gepolte Elektrode	39
5.1.1.2	Elektrisch positiv gepolte Elektrode.....	45
5.1.2	Einseitig koaxiale Anordnung	50
5.1.2.1	Elektrisch negativ gepolte Elektrode	50
5.1.2.2	Elektrisch positiv gepolte Elektrode.....	55
5.2	Temperaturmessung und Berechnung der Elektronenaustrittsarbeit.....	60
5.3	Mechanische Bearbeitung.....	61
5.4	Laser-Plasma-Löten von Aluminium	63
6	Interaktion zwischen beeinflusster Oberfläche und Lichtbogen...68	
7	Laser-Plasma-Hybridlöten von Aluminiumlegierungen	77
8	Zusammenfassung.....	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Anhang	90
	Veröffentlichungsliste	93
	Ergebnisse aus studentischen Arbeiten.....	97
	Reihe Strahltechnik im BIAS Verlag	98

Abkürzungen und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	%	Absorption
AC	--	Wechselstrom
Al ₂ O ₃	--	Aluminiumoxid
α	K ⁻¹	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient
b	m V ⁻²	Kerr-Konstante
c	m s ⁻¹	Lichtgeschwindigkeit
DC	--	Gleichstrom
DCEN	--	Gleichspannung mit negativer gepolter Elektrode
DCEP	--	Gleichspannung mit positiv gepolter Elektrode
CMT	--	Cold-Metal-Transfer
CO ₂	--	Kohlenstoffdioxid
e	C	Elementarladung
E	N m ⁻²	Elastizitätsmodul
E _{Ph}	e V	Photonenenergie
ϵ_0	A s / V m	Dielektrizitätskonstante
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz
γ	°	Biegewinkel
h	J s	Plancksches Wirkungsquantum
I	A	Lichtbogenstrom
J _e	A/mm ²	Stromdichte

k_B	$J\ K^{-1}$	Boltzmann-Konstante
L_{N1}	mm	Ursprüngliche neutrale Faser
L_{A1}	mm	Ursprüngliche äußere Faser
L_{N2}	mm	Gebogene neutrale Faser
L_{A2}	mm	Gebogene äußere Faser
λ	nm	Wellenlänge
$d\lambda$	nm	Wellenlängenänderung
λ_c	pm	Comptonwellenlänge
λ'	nm	Wellenlänge plus Compton
n_{PL}	m^3	Plasmadichte
n_e	--	Veränderte Brechzahl
n_0	--	Ursprüngliche Brechzahl
Nd-YAG	--	Neodym Yttrium-Aluminium-Granat
ν	--	Poissonszahl
MgO	--	Magnesiumoxid
m_e	g	Elementarmasse
P	W	Lichtbogenleistung
PBF	--	Pilling-Bedworth-Verhältnis
φ	°	Streuwinkel
R	%	Reflexionsgrad
R_K	mm	Kreisradius
R_a	μm	Mittelrauhwert
T_R	%	Transmission
T	°C	Temperatur
T_{max}	°C	Maximaltemperatur

t_{Al}	mm	Blechdicke Aluminium
t_{Oxid}	mm	Blechdicke Oxid
σ	MPa	Biegespannung
U_a	V	Spannung
U_K	V	Kathodenfallspannung
U_A	V	Anodenfallspannung
U_E	V	Abfall der Spannung in der Säule
dU	%	Spannungsunterschied
U_{nach}	V	Spannung nach Abschalten des Lasers
U_{mit}	V	Spannung vor Abschalten des Lasers
v	m/min	Geschwindigkeit
W_e	eV	Austrittsarbeit
WIG	--	Wolfram-Inert-Gas
Yb-Faserlaser	--	Ytterbium - Yttrium Aluminium Granat Faserlaser

1 Einleitung

Aluminiumwerkstoffe sind als Treiber der industriellen Leichtbauentwicklung in der Strukturmechanik nicht mehr wegzudenken. Das wichtige Thema 'Leichtbau' ist ein stark diskutiertes Thema, welches mittlerweile auch Platz in politischen Entscheidungen gefunden hat. Insbesondere sind hierbei automobiltechnische Themen von Bedeutung. So liegen die neuen Richtlinien für den CO₂-Ausstoß von neuen Kraftfahrzeugen im Jahre 2020 bei 95 mg/km. Eine Art diese Werte zu erreichen besteht in der Möglichkeit, effizientere Motoren zu entwickeln. Ein weiterer Ansatz, der sich auch in vielen anderen industriellen Anwendungen wiederfindet, liegt in der Substitution von Stahlkomponenten durch Leichtmetalle wie Aluminium. Durch die Reduzierung des Gewichtes eines Kraftfahrzeuges um 100 kg können so bis zu 8,5 g CO₂ pro km eingespart werden. Ein verstärkter Einsatz dieser Materialien liegt daher im Fokus der Entwicklung.

Individuelle Designkonzepte gewähren dabei immer häufiger den Blick auf Oberflächen von Fügeverbindungen, die daher eine hohe Oberflächengüte vorweisen müssen. Bisherige Fügekonzepte, welche sich primär durch Effizienz in Bezug auf hohe Geschwindigkeiten auszeichnen, müssen meist den Kompromiss ungleichmäßiger Nahtoberflächen und den Einsatz von Flussmitteln eingehen.

Zur Vermeidung gesundheitsschädlicher Substanzen, wie in Flussmitteln eingesetzt, sowie zur Gewährleistung eines effizienten Fügeprozesses werden Einzelverfahren kombiniert und so neue Hybrid-Prozesse geschaffen, welche die Vorteile von Effizienz und Robustheit kombinieren und so neue Potentiale im Bereich der Fügeprozesse erschließen. Die Frage nach dem Grund dieser Effizienzsteigerung soll Treiber und Motivator der nachfolgenden Untersuchungen sein.

2 Stand der Forschung

2.1 Plasmalichtbogen

2.1.1 Physik des Lichtbogens

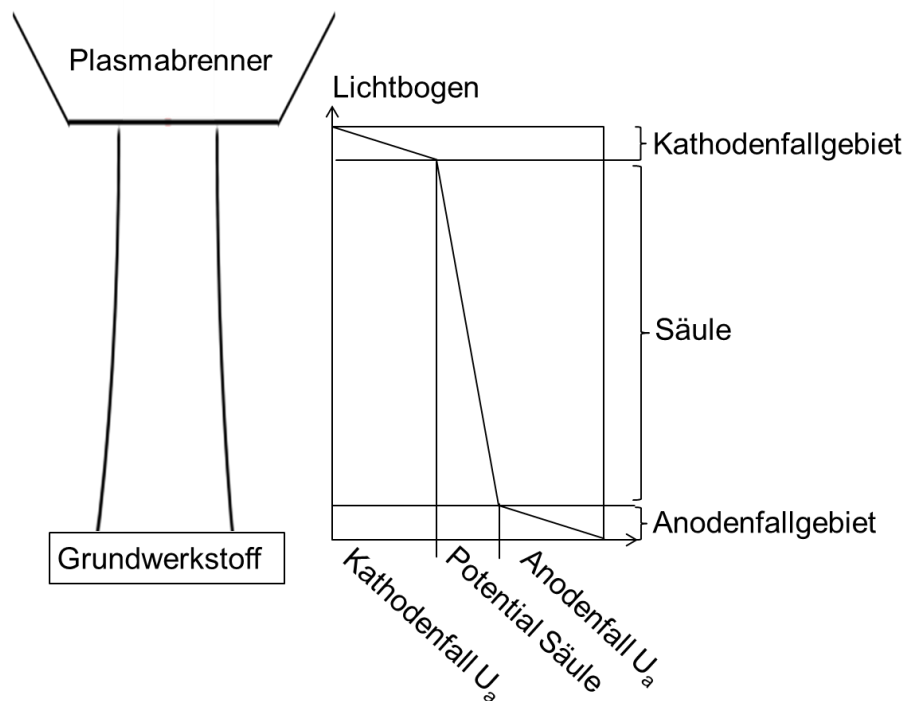
Ein Plasmalichtbogen und in diesem Fall ein Schweißlichtbogen ist eine sich selbst erhaltende Gasentladung. Alle Vorgänge, wie zum Beispiel die Bereitstellung von stromübertragenden Ladungsträgern, werden vom Lichtbogen selbst erzeugt. Dies bedeutet, dass sich innerhalb des Lichtbogens Elektronen, Ionen sowie neutrale Teilchen (Atome) befinden. Die für den Stromtransport verantwortlichen dominierenden Teilchen sind die Elektronen. Mit einem Anteil von bis zu 99,9 % decken sie den Großteil des Stromflusses ab [Cui91]. Der Strom wird durch Anpassung der Spannung konstant gehalten, so dass eine Beeinflussung des Lichtbogens im Spannungsverlauf sichtbar wird. Darüber hinaus ist die Stabilität des Lichtbogens definiert über die Kontinuität des Nahtverlaufs sowie die Schwankung um die Abbildung des Elektrodenmittelpunktes auf der Blechoberseite [Hu05]. Ein durch eine extrinsische Größe hervorgerufener Effekt, der zur Absenkung der Spannung führt sowie zur Fokussierung des Lichtbogens auf einen definierten Mittelpunkt, ist somit ein Indiz für eine Stabilisierung des Lichtbogens.

Die Emission der Elektronen kann dabei auf unterschiedliche Weise erfolgen: Glühemission und Feldemission. Eine Überlagerung beider Effekte wird Temperatur-Feld-Emission genannt [Sch85]. Die Glühemission beruht auf der Überschreitung der Bindungsenergie der Atome bei hohen Temperaturen. Es können Elektronen austreten. Basierend darauf kann laut [Sar10] die Glühemission nur bei Werkstoffen mit sehr hohen Schmelztemperaturen wie zum Beispiel Wolfram auftreten. Die Feldemission beruht hingegen auf der Anregung der Atome durch elektromagnetische Wechselwirkungen. Elektronen können hierbei durch den Tunneleffekt [Goo56] aus den Atomen herausgelöst werden. In Bezug auf den verwendeten Werkstoff Aluminium kommt es zu einer Überlagerung der Effekte [Lan86]. Der makroskopische Unterschied zwischen den beiden Elektronenemissionsarten liegt in der Beweglichkeit des Lichtbogenansatzes. Bei der Glühemission setzt der Lichtbogen auf einem relativ großen ortsfesten Bereich an. Im Gegensatz dazu bewegt sich der Lichtbogen bei Feldemissionen hochdynamisch [Cou97].

Der Anteil der Ionen liegt bei 0,2 % bis 0,3 % und kann somit vernachlässigt werden, da sie sich aufgrund ihrer vergleichsweise großen Masse eher langsam fortbewegen. Ihnen kommt primär die Rolle des Ladungsausgleichs zu, da ein Lichtbogen nach außen betrachtet quasi neutral ist. Der Vorteil dieser Eigenschaft ist, dass es so ermöglicht wird, bei relativ geringen Spannungen hohe Ströme realisieren zu können. Die Leitfähigkeit kann bei einem ausreichend hohen Ionisationsgrad mit der von Metall verglichen werden, wobei die Leistungsflussdichte je nach Schweißparameter zwischen 10^2 W/cm^2 und

10^6 W/cm^2 variiert [Ant78]. Der Lichtbogen bildet über die gesamte Wegstrecke ein Minimumprinzip aus, welches besagt, dass die Stromverteilung über den Lichtbogenweg bezüglich Energieverluste minimal ist. Mit anderen Worten folgt der Lichtbogen immer dem Weg des geringsten Widerstands. Die Folge dieses Effektes ist, dass es zu unvorhersehbaren Schwankungen der Position des Lichtbogens auf der Oberfläche kommen kann. In [Hu05] wird in diesem Fall von einem instabilen Lichtbogen gesprochen.

Vereinfacht betrachtet besteht ein Schweißlichtbogen aus drei charakteristischen Bereichen: dem Kathodenfallgebiet, der Bogensäule und dem Anodenfallgebiet (siehe Abbildung 2-1).



Möller 2015

BIAS ID 152335

Abbildung 2-1: Spannungsverlauf innerhalb eines Schweißlichtbogens mit den drei charakteristischen Bereichen [nach Sch09]

Den größten Volumenanteil des Lichtbogens macht die Bogensäule aus. Der Spannungsabfall variiert dabei stark in Abhängigkeit von Gasgemisch und Druck und beträgt zwischen 5 V/cm bis 50 V/cm . In der Säule liegt ein partiell lokales thermisches Gleichgewicht vor. Das bedeutet, dass Energieverluste durch Strahlung, Konduktion, Konvektion sowie Ionisationsvorgänge durch den Stromdurchtritt ausgeglichen werden. Der Stromfluss bzw. der Durchmesser der Bogensäule stellt sich selbständig so ein, dass der Energieverlust bezogen auf die Oberfläche minimal ist. Der Ionisationsgrad kann mittels der Eggert-Saha-Gleichung [Rug80] bestimmt werden. Die Bogensäule stellt beim Lichtbogen eine Ladungsstrecke dar, welche das Kathoden- und Anodenfallgebiet verbindet, die nur wenige μm in den Bereich des Lichtbogens hineinreichen.

Die Raumladung nahe der Anode ist negativ, da sich fast nur Elektronen dort aufhalten. Die von der Säule aus in Richtung der Anode beschleunigten Elektronen treffen auf die Anode und geben ihre kinetische Energie in Form von Wärme ab. Ebenfalls kommt es dort zu Kollisionen mit neutralen Teilchen, wodurch Ionen erzeugt werden, die dann zur Säule hin abwandern. Der Spannungsabfall beträgt, abhängig von der Stromstärke, im Durchschnitt 0 V bis 30 V [Cui91]. Wird die Anode verdampft, kann die Umgebung leichter ionisiert werden und es bildet sich ein Brennfleck aus. Bei oxidiertem Anodenoberfläche befindet sich der Anodenbrennfleck überwiegend an Stellen mit entfernter Oxidschicht, da reines Metall leichter zu ionisieren ist als dessen Oxide [Ros09].

Beim Kathodenfallgebiet werden primär die freien Elektronen erzeugt. Dieser Zusammenhang wird durch die Richardson-Dushman-Gleichung (Gl. 2.1) beschrieben. Mittels dieser Gleichung kann die Abhängigkeit der Elektronendichte von der Temperatur und Austrittsenergie der Kathode beschrieben werden.

$$j_e = \frac{4 \pi m_e k}{h^3} T^2 \exp\left[-\frac{eU_a}{kT}\right] \quad (2-1)$$

Im Falle der Verdampfung der Kathode kann die Temperatur nicht weiter gesteigert werden und durch die thermische Emission kann keine ausreichende Elektronendichte erzeugt werden. Der dann greifende Schottky-Effekt beschreibt, dass durch Anlegen eines elektrischen Feldes die thermische Emission deutlich erleichtert wird. Der Zusammenhang ist in Gl. 2.2 gezeigt:

$$j_e = \frac{4 \pi m_e k}{h^3} T^2 \exp\left[-\frac{e[U_a - \sqrt{\frac{e^3 E}{4 \pi \epsilon_0}}]}{kT}\right] \quad (2-2)$$

Die dort erzeugten Elektronen werden von dort in die Bogensäule beschleunigt und führen durch Kollision zur Ionisierung. Im Gegensatz dazu werden die dort befindlichen Ionen zur Kathode beschleunigt und führen zu einer Erwärmung der Oberfläche. Der Spannungsabfall beträgt hier etwa 5 V bis 20 V [Cui91].

Die vom Lichtbogen umgesetzte Leistung ergibt sich zu

$$P = I (U_K + U_A + U_E) = I U_L \quad (2-3)$$

U_K = Kathodenfallspannung

U_A = Anodenfallspannung

U_E = Spannungsabfall der Lichtbogensäule

2.1.2 Lichtbogenansatz

Durch die Analyse von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden in zahlreichen Arbeiten die Ansatzpunkte des Lichtbogens beobachtet. Die Ergebnisse liefern dabei Erkenntnisse zur Frage der Positionierung der sich bildenden Ansatzpunkte. Es wird angenommen,

dass sich, bedingt durch die isolierende Wirkung des Aluminiumoxids und des daraus resultierenden Potentialunterschieds zum Aluminium, der Lichtbogen bevorzugt an den Aluminium-Aluminiumoxidstufen ansetzt [Pet91]. In Sarrafi und Kovacevic wird erläutert, dass die kathodisch gereinigte Aluminiumoberfläche kraterförmige Oberflächenstrukturen aufweist. Bei der REM-Analyse zeigt sich, dass die gereinigte Oberfläche aus vielen kleinen Kratern besteht, welche wiederum von kleinen Graten umrandet werden. Diese Oberflächenstrukturen werden auf den Druck des verdampfenden Materials zurückgeführt [Sar10]. Die Unabhängigkeit der Geometrie der Krater zur Lichtbogenleistung wird von Arai et al. gezeigt [Ara08]. Analog dazu können ähnliche Strukturen auf Wolframoberflächen gezeigt werden. Die Vertiefungen werden hier auf den wirkenden Plasmadruck und nicht auf den Verdampfungsdruck zurückgeführt. Die Materialanhäufungen entstehen aber ebenfalls durch verdrängtes flüssiges Material [Wen00]. Basierend auf den Erkenntnissen von Wendelsdorf und der Analogie von Wolfram- und Aluminiumoberflächen werden folgende Schlussfolgerungen für Aluminium in der Literatur beschrieben:

1. Bei Aluminiumwerkstoffen und positiver Elektrodenpolung setzt der Lichtbogen an Oxidschichtkanten oder auf bzw. an den Rändern von Schmelzbädern an.
2. An den Oxidschichtkanten ist der Lichtbogenansatz brennfleckbehaftet sowie hochdynamisch. Dieser Effekt wird durch die Feldverzerrungen erklärt, die durch stark unterschiedliche Leitfähigkeit zwischen Aluminium und Aluminiumoxid entstehen. Innerhalb der Lichtbogenwirkzone wird die Oberfläche gereinigt und führt zu einer rauen Oberfläche. Daraus entstehen neue Ansatzpunkte für den Lichtbogen [Ros09]. Es konnte gezeigt werden, dass die Feldstärke an den Rauheitsspitzen bis zu einem Faktor von 10 erhöht werden kann [Jüt75].
3. Neben den Schmelzbädern kommt es auch zur Ausbildung einer rauen Oberfläche und daraus resultierenden Feldverzerrungen [Zäh10]. Untersuchungen der Reinigungsbereiche neben einem WIG-AC Schmelzbad zeigen, dass sich zwei verschiedene Bereiche ausbilden. Angrenzend an das Schmelzbad kann ein Bereich mit einem arithmetischem Mittelrauhwert von $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ ermittelt werden. Angrenzend folgt ein weiterer Bereich mit $R_a = 1,8 \mu\text{m}$. Die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit wird durch den Abstand vom Plasmazentrum und eines daraus folgenden nicht kontinuierlich ansetzenden Lichtbogens sowie der erhöhten Wärmeeinbringung in der Nähe des Schmelzbades erklärt [Sar10].
4. Auf dem Schmelzbad wird der Lichtbogenansatz durch entstehende Metaldämpfe erklärt. Es kommt zum Eindringen von Metallpartikeln in die Plasmafackel. Dadurch kann die elektrische Leitfähigkeit des Argons wesentlich gesteigert und der Stromfluss erleichtert werden [Ros09].

2.2 Laserstrahl

2.2.1 Wärmeleitschweißen

Bei der Untersuchung von Laserstrahlschweißprozessen muss grundsätzlich zwischen den beiden Regimes "Wärmeleitschweißen" [Hüg92] und "Tiefschweißen" [Bey95] unterschieden werden (Abbildung 2-2).

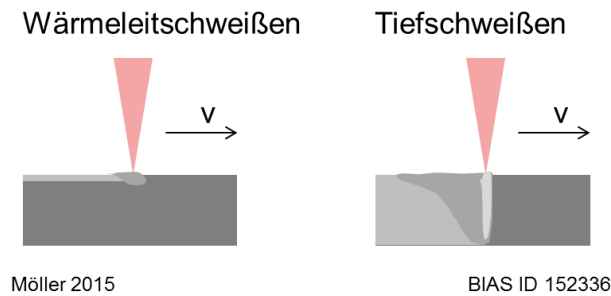


Abbildung 2-2: Prinzip Wärmeleitschweißen / Tiefschweißen [nach Bey95]

Welches Regime bei gegebenen Bearbeitungsparametern vorliegt, ist im Wesentlichen von der Intensität, der Wellenlänge und der Polarisation sowie den Eigenschaften des zu schweißenden Materials (wie z.B. spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, etc.) abhängig (so z.B. [Kro93]).

Für Intensitäten zwischen 10^4 W/cm^2 und 10^5 W/cm^2 kommt es durch die Absorption der Laserstrahlung in der Werkstückoberfläche zu einem Aufschmelzen des Werkstoffes. Der Transport der in der Werkstückoberfläche absorbierten Energie in das Werkstückinnere erfolgt dabei überwiegend durch Wärmeleitung [Rad88].

Der Betrag der Absorption hängt dabei stark von der Wellenlänge und dem verwendeten Werkstoff ab. Die Absorptions- (A), Reflexions- (R) und Transmissionsbilanz (T_R) folgt dabei:

$$1 = T_R + R + A \quad (2-4)$$

Da es bei den durchgeführten Versuchen nicht zum Durchschweißen der Proben kam, konnte die Transmission vernachlässigt werden.

Mit zunehmender Leitfähigkeit steigt der Reflexionsgrad [Cui91], weshalb Laserstrahlung von metallischen Werkstoffen stark reflektiert wird. Dies zeigt sich beispielsweise bei der Verwendung einer Strahlquelle der Wellenlänge 1064 nm an dem mit 30 % vergleichsweise hohen Absorptionsgrad von Stahl, wohingegen der Absorptionsgrad von Aluminium bei 5 % liegt. Prinzipiell ist für die Einkopplung der Laserstrahlung nur eine dünne Schicht an der Werkstoffoberfläche von Bedeutung, da durch den Skin Effekt der Elektronen im Leitungsband eine Eindringtiefe in den Werkstoff von ca. 9 nm möglich ist [Dau95]. Darüber hinaus wird in [Sei06] der Einfluss der

Oberflächenrauheit beschrieben. Dabei zeigt sich eine zunehmende Absorption mit steigender Oberflächenrauheit.

2.2.2 Tiefschweißen

Für Intensitäten ab etwa 10^6 W/cm^2 wird (abhängig von Werkstoff und Schweißgeschwindigkeit) lokal die Verdampfungstemperatur des Werkstücks überschritten, und es bildet sich im Werkstück eine Dampfkapillare (Keyhole) aus [And75]. Experimentelle (z.B. [Kla00]) und theoretische (z.B. [Kro93]) Untersuchungen haben gezeigt, dass der Radius dieser Dampfkapillaren etwa das ein- bis zweifache des Fokusradius beträgt. Wird der Zustand einer ausgebildeten Dampfkapillare einmal erreicht, ist die Absorption im Vergleich zum "Wärmeleitschweißen" mit deutlich über 80 % (abhängig vom Aspektverhältnis) erhöht [Dau95] und sowohl die Wellenlängen- als auch die Oberflächenabhängigkeit der Absorption sind nur noch von untergeordneter Bedeutung [Kro93]. Das tiefe Eindringen der Kapillare in Verbindung mit dem durch die verbesserte Strahleinkopplung höheren Prozesswirkungsgrad ermöglicht insbesondere das Schweißen dickerer Bleche, wobei durch den nicht nur auf die Werkstückoberfläche begrenzten Energieeintrag sehr schlanke Nähte mit einem Aspektverhältnis deutlich größer 3:1 erzielt werden können [Bey84]. Hier wird dann vom "Tiefschweißen" gesprochen.

Bei einer weiteren Erhöhung der Intensität auf Werte ab etwa 10^7 W/cm^2 bis 10^8 W/cm^2 kann der aus der Dampfkapillare ausströmende Metaldampf ionisiert werden. Beim Schweißen von Metallen kann sich so, abhängig von den Bearbeitungsparametern, ein Niedertemperaturplasma mit einer Elektronentemperatur von ca. 5000 K bis 20000 K bilden (siehe Übersicht in [Bec96]). Dabei wird das in der Dampfkapillare befindliche Niedertemperaturplasma von dem über dem Werkstück befindlichen Anteil unterschieden. Letzterer kann signifikante Anteile von Schutz- und Arbeitsgasen enthalten, ist im Wesentlichen diffusionsbestimmt und kann das Werkstück von der auftretenden Strahlung abschirmen [Bey84] bzw. über Streuung und lokale Brechungsindexgradienten die Strahleigenschaften so verschlechtern [Fra98], dass der Schweißprozess gestört wird [Kat08]. Das Niedertemperaturplasma in der Dampfkapillare kann absorbierte Energie über die Oberfläche der Dampfkapillare wieder an das Werkstück abgeben, wobei es zwei Meinungen gibt, ob dies primär über Wärmeleitung [Dow89] oder Rekombination von Ladungsträgern an der Kapillaroberfläche [Fin90] geschieht. Der aus dem Keyhole ausströmende Dampf wird dabei in unterschiedliche Richtungen abgelenkt. Diese basieren auf den Schwingungen des Keyholes [Fab06].

2.3 Laser-Lichtbogen-Wechselwirkung

Moderne Fügeverfahren unterliegen heutzutage hohen Anforderungen. Die Realisierung robuster und effizienter Verfahren kann teilweise nur durch den Einsatz von Hybridverfahren erfolgen. Dabei können Synergieeffekte gewonnen werden, die eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Verfahren mit sich bringen. Mit der zunehmenden Verbreitung des Laserstrahlschweißens rücken laserbasierte Hybridverfahren als eine potentielle Möglichkeit in den Fokus der Wissenschaft und Industrie, um die immer höheren Anforderungen an Kosten- und Zeitreduzierung zu erfüllen. Insbesondere zu nennen sind dabei zum einen in allen bekannten Veröffentlichungen herausgestellt, die signifikante Steigerung der Prozessgeschwindigkeit, durch einen stabilisierenden Effekt des Laserprozesses auf den Lichtbogen sowie zum anderen die Steigerung der Robustheit des Prozesses gegenüber Spalten und Kantenversatz. In Tabelle 1 wird eine Übersicht hybrider Verfahren in Bezug zu den jeweiligen Anwendungen und Institutionen gezeigt.

Tabelle 1: Übersicht über anwendungsorientierte Laser-TIG/Plasma Hybridverfahren [Sey02]

Verfahrenskombination	Aufbau	Anwendungsfeld	Institution
Laser + WIG	Einseitig	Schweißen, Schneiden, Bohren, Oberflächenbearbeitung	[Ste79a], [Ste80], [Ham81], [Has85], [Hos85]
Laser + WIG	Beidseitig	Schweißen, Schneiden	[Ste79a], [Ste80], [Shu84]
Laser + MSG	Einseitig	Schweißen	[Ham84], [Yon89]
Laser + MSG	Beidseitig	Schweißen	[Oma88]
Laser + direktes Plasma	Einseitig	Schweißen, Schneiden	[Kan85b], [Wal94], [Cul94], [Tus96]
Laser + direktes Plasma	Beidseitig	Schweißen	[Ono86]
Laser + indirektes Plasma	Einseitig	Schweißen, Schneiden, Härten, Spritzen	[Kan85a], [Yon89]

Ein spezieller Fokus der Forschung liegt dabei auf der Identifizierung des dominierenden Mechanismus der stabilisierenden Wirkung des Lasers auf den Lichtbogen.

Erstmalig dokumentiert wurde die Untersuchung der Wechselwirkung beim Laser-Lichtbogen-Prozess in [Ste80]. Als Basis der Versuche dienten ein CO₂-Laser sowie ein WIG-Verfahren. Zur Untersuchung wurden die Verfahren sequentiell aufgebaut. Darüber hinaus konnte der Aufbau für eine beidseitige Anordnung der Prozesse genutzt werden. Als Werkstoff wurde Titan verwendet. Die gezeigten Ergebnisse lieferten erste Hinweise

zum Einfluss der Temperatur auf die Absenkung der Lichtbogenspannung. Durch Hinzuschalten des Laserstrahls auf der gleichen Seite konnte die Spannung des Lichtbogens um bis zu 4 V reduziert werden. Gleichzeitig stieg der Strom im Prozess an. Bei der beidseitigen Bearbeitung konnte ein Effekt nur bei sehr dünnem Material von 0.2 mm beobachtet werden. Bei dickem Material war kein Effekt nachweisbar. Bei der gleichseitigen Wirkzone liegt der Vorteil des CO₂-Lasers in der Einkopplung des Laserstrahls in das vorherrschende Plasma. Dies ist bedingt durch die Eigenschaft seiner Wellenlänge von 10,64 μm , bei der es zur Wirkung der inversen Bremsstrahlung kommt. Die Einkopplung bewirkt eine verstärkte Ionisation des Lichtbogens und damit ein Fokussieren des Lichtbogens zur Wirkzone des Laserstrahls.

Ebenfalls werden Erkenntnisse zur Laser-Lichtbogen-Wechselwirkung von [Cui91] beschrieben. Seine Arbeiten beschäftigen sich mit dem Thema der Wechselwirkungen zwischen CO₂-Laserstrahl und Plasmalichtbogen bei Stahlwerkstoffen. Es konnte festgestellt werden, dass ein durch den CO₂-Laser induziertes Plasma zu einem Fokussieren des Lichtbogens führt. Der Lichtbogen wird durch Einsatz des Laserstrahls schmaler. Es konnte gezeigt werden, dass bei einem Hybrid-Verfahren 80 % des Stromes mittig entlang der Laserwirkzone geführt werden. Weiter wird beschrieben, dass ein Abfall der Lichtbogenspannung zu verzeichnen war. Es wurde nahegelegt, dass dieser Effekt nur im Anodenfallgebiet oder in der Lichtbogensäule auftreten konnte, da die Kathode nicht im Wirkungsbereich der Laserstrahlung lag. Basierend darauf konnte geschlussfolgert werden, dass eine Veränderung der Spannung mit dem Ionisationsgrad des im Plasmabereich befindlichen Mediums zusammenhängt. Bei der gezeigten Schweißverbindung kommt es zur Ausbildung einer Dampfkapillare und Metaldampf strömt in die Lichtbogensäule ein.

Weitere Untersuchungen zum Laser-Plasma-Schweißen wurden in [Sey02] vorgestellt. Dabei wurden ein CO₂-Laser sowie ein MSG-Verfahren eingesetzt. Als Grundmaterial wurde Aluminium verwendet. Das Besondere bei diesem Verfahren war u.a. ein coaxialer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wechselwirkungen des Prozesses. Ein coaxialer Aufbau hat den Vorteil, dass speziell auf industrielle Nachfrage eine Richtungsunabhängigkeit realisiert werden kann. Es konnte festgestellt werden, dass durch den Einsatz dieses Lasers die Temperatur unterhalb bzw. innerhalb des Lichtbogens gesteigert wird. Dies führte zu einem höheren Ionisationsgrad und zu einer verbesserten Leitfähigkeit. Die Theorie der Wärmeverteilung innerhalb des Lichtbogens wird allerdings durch Untersuchungen und Simulation von Schnick et al. [Sch08] nicht bestätigt. Hier konnte sogar eine Abnahme der Temperatur festgestellt werden.

In [Kli07] werden fünf Mechanismen zur Stabilisierung des Lichtbogens, namentlich der photoelektrische Effekt, die laserinduzierte Strahlung, die inverse Bremsstrahlung,

laserinduziertes Plasma sowie der optogalvanische Effekt, untersucht. In den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Lichtbogen bei erhöhten Fügegeschwindigkeiten durch die Einbringung eines Laserstrahls stabilisiert werden kann. Während der Untersuchungen wurden ein gepulster sowie ein ungepulster Laser verwendet. Für die jeweiligen Betriebsarten konnten unterschiedliche dominierende Mechanismen festgestellt werden. Solange der Laser sich im gepulsten Modus befindet, überwiegt das laserinduzierte Plasma bei der Stabilisierung des Lichtbogens. Die dargestellten Ergebnisse belegen, dass eine hohe Pulsenergie eine Verdampfung von Metallpartikeln zufolge hat, was in einer Verbesserung der Leitfähigkeit des Lichtbogens resultiert. Aussagen über die Intensitäten oder Pulsenergien wurden nicht gegeben. Da dieser Effekt über eine große Parameterspanne zu beobachten war, wird in der Veröffentlichung der Schluss nahe gelegt, dass der Lichtbogen durch laserinduzierte Materialablation stabilisiert wird. Insbesondere bei gepulsten Lasern liegt dieser Effekt aufgrund von hohen Leistungsdichten vor.

Im cw-Betrieb wurde neben dem obenstehenden Effekt der optogalvanische Effekt als dominierender Mechanismus zur Stabilisierung identifiziert. Grundsätzlich beschreibt der optogalvanische Effekt, dass durch eine eingestrahlte Laserleistung die Besetzungsdichte der sich im Plasma befindlichen Atome ändert. Eine ausreichende Energie der Photonen wird dabei vorausgesetzt [Dem10]. Die Folge der Laserstrahlung ist daher die Anregung von Atomen im Bereich der Plasmawirkzone. Dies führt dazu, dass ein Elektron deutlich weniger Energie benötigt, um aus dem Atomverbund herausgeschleudert zu werden. Innerhalb des Lichtbogens können dann durch Stöße von Atomen, Ionen und Elektronen bereits weitere freie Elektronen erzeugt werden. Das Ergebnis ist eine Abnahme des elektrischen Widerstandes und damit auch einer Reduzierung der Spannung. Ein Argument für die Hypothese des optogalvanischen Effektes war die Tatsache, dass innerhalb der Experimente trotz Defokussierung des Laserstrahls und damit eines sehr geringen Metaldampfolumens, eine Stabilisierung des Prozesses beobachtet wurde.

Mit Blick auf Wechselwirkungen zwischen Material und Materie werden in der Literatur weitere Mechanismen beschrieben, die auf eine direkte Wechselwirkung des Lasers mit dem Lichtbogen schließen lassen:

- Photoelektrischer Effekt
- Compton-Effekt
- Inverse Bremsstrahlung
- Kerr-Effekt

Der photoelektrische Effekt basiert darauf, dass ein Photon von einem atomar gebundenen Elektron vollständig absorbiert wird. Die Elektronen werden gelöst und können durch ein externes elektrisches Feld in der Ausgangsmaterie transportiert werden,

wobei sie zu dessen Leitfähigkeit beitragen [Dem10]. Bereits in [Stu07] wurden Untersuchungen zum Einfluss des Photoeffektes auf den Laser-Plasma-Prozess durchgeführt. Bei den Experimenten kam ein Excimer-Laser der Wellenlänge 266 nm mit einem Spotdurchmesser von 2 mm zum Einsatz. Als Ausgangsmaterial wurde ein Aluminiumblech mit der Bindungsenergie von $W_e = 4,2 \text{ eV}$ verwendet. In den Analysen konnte kein Einfluss des Photoeffektes auf den Gesamtprozess festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Photoionisation unabhängig von der Intensität des einfallenden Lichtes stattfindet. Es wird erwähnt, dass die typischerweise für Hybridschweißprozesse verwendeten Laser nicht die Energiemengen bereitstellen können, um einen messbaren Effekt auszulösen.

Beim Compton-Effekt hingegen kommt es zur Interaktion der Photonen mit freien und gebundenen Elektronen der atomaren Außenschalen, wie sie im Plasmalichtbogen vorkommen. Im Gegensatz zum Photoeffekt wird das Photon nicht vollständig absorbiert, sondern gibt nur einen Teil seiner Energie und seines Impulses weiter. Es kommt zu einer Ablenkung des Photons aus seiner ursprünglichen Richtung. Da weiterhin das Gesetz der Energieerhaltung herrscht, kommt es bei der Übertragung von Energie zur Verschiebung der Wellenlänge. Diese hängt nicht vom streuenden Material ab [Ard05]. Bei der Betrachtung der sich ergebenden Streustrahlung kann eine größere Wellenlänge (λ) beobachtet werden. Der Zusammenhang aus den Gleichungen 2.5 und 2.6 zeigt, dass eine kleinere Frequenz (f) und Energie im Vergleich zum einfallenden Photon berechnet werden kann.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2-5)$$

$$E_{ph} = h \cdot f \quad (2-6)$$

Durch den in Gleichung 2.7 beschriebenen Zusammenhang lässt sich aus Energie- und Impulserhaltungssatz in Abhängigkeit des Streuwinkels φ des Photons die Wellenlängenänderung herleiten. Es kommt dabei zum Erreichen eines Maximums bei einem Streuwinkel von 180° .

$$\Delta\lambda = \frac{h}{c+m_e} \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (2-7)$$

Zusammengefasst:

$$\Delta\lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos(\varphi)) \quad (2-8)$$

Die Wellenlänge λ_c wird in der Literatur als Compton-Wellenlänge bezeichnet und ergibt einen Wert von

$$\Delta\lambda = \frac{h}{c+m_e} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \text{ pm} \quad (2-9)$$

Es kann gefolgert werden, dass die Wellenlängendifferenz nicht von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung abhängt, sondern nur vom Streuwinkel. Die Compton-Streuung

ist zudem, anders als der Photoeffekt, unabhängig von der Ordnungszahl der Atome [Dem10].

Ein weiterer Effekt ist die Bremsstrahlung. Er beschreibt, dass eine elektrische Ladung, die in einem Kraftfeld beschleunigt wird, elektromagnetische Strahlung emittiert [Jac75]. Sollte der Fall eintreffen, dass die elektromagnetische Welle absorbiert und dabei die elektrische Ladung gestreut und beschleunigt wird, wird von der inversen Bremsstrahlung gesprochen. Der Effekt hängt hierbei signifikant vom Absorptionskoeffizienten der eingebrachten Strahlung ab, welcher von Dichte und Temperatur der durchstrahlten Materie sowie der Frequenz bzw. Wellenlänge der einfallenden Strahlung abhängt. Der Koeffizient sagt aus, um welchen Betrag die Intensität einer sich im Plasma ausbreitenden elektromagnetischen Welle pro Längeneinheit abnimmt. In Untersuchungen von [Pau93] wird gezeigt, dass der Effekt der inversen Bremsstrahlung der dominierende Mechanismus bei Abschwächung der durchstrahlenden Laserstrahlung ist. Beim konventionellen Schweißen kommt überwiegend ein Argon-Plasma mit atmosphärischem Druck zum Einsatz, welches in der Bogensäule Temperaturen von 10000 K bis 25000 K aufweist [Low92]. Für eine mittlere Temperatur von 14000 K konnte [Ols59] zeigen, dass die Plasmadichte n_{PL} konstant bei $\sim 1,5 \text{ m}^{-3}$ bis $2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ liegt. Dieser Wert kann zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten herangezogen werden. Es zeigt sich, dass der Absorptionskoeffizient des CO_2 -Lasers zwischen $4 \times 10^1 \text{ m}^{-1}$ und $6 \times 10^1 \text{ m}^{-1}$ und im Fall des Nd:YAG Lasers zwischen $2 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ und $4 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ liegt. Das bedeutet, dass beim CO_2 -Laser 40 % der Ausgangsleistung bereits nach einer Durchstrahlstrecke von 1 cm absorbiert werden. Für den Fall des Nd:YAG-Lasers beträgt dieser Wert nur 0,3 %.

Der Kerr-Effekt wird in Bezug zu optischen Eigenschaften erwähnt und ist ein Effekt der nichtlinearen Optik. Er basiert darauf, dass durch Anlegen eines externen elektrischen Feldes sich die Ladungsträger neu orientieren. Dies führt zur Beeinflussung der optischen Eigenschaften wie zum Beispiel der Änderung der Brechzahl. Die Differenz des veränderten (n_e) zum ursprünglichen (n_0) Brechungsindex ist dabei proportional zum Quadrat der angelegten Spannung U :

$$\Delta n = n_e - n_0 = b \cdot U^2 \quad (2-10)$$

Die Proportionalitätskonstante b wird hierbei als Kerr-Konstante bezeichnet und ist als Materialkonstante von dem verwendeten Medium abhängig.

Gegen die in [Klin07] genannte Hypothese legen weitere Untersuchungen in [Sch09] nahe, dass eine Absorption des Laserstrahls bei einer Wellenlänge von 1070 nm durch den Plasmalichtbogen auszuschließen ist. Die Annahme, dass bis zu 10 % absorbiert werden, beruht auf der Annahme, dass der Laserstrahl als Wärmequelle im Lichtbogen dient. Bei Absorption erhöht sich im Zentrum der Plasmasäule die Temperatur um bis zu

1000 K. Der Einfluss auf Stromdichte und Lichtbogenspannung ist aber gering. Der Effekt der Einkopplung konnte durch [Emd14] experimentell nachgewiesen werden. Die Arbeiten zeigen, dass nur bei einer definierten Wellenlänge von (810,4 nm und 811,5 nm) eine ausreichende Absorption und damit eine Spannungsänderung möglich ist. Die Messungen wurden dabei durch Spektralanalysen unterstützt. Resultierend wurde eine Spannungsabnahme von 0,16 V identifiziert, was einer Spannungsabnahme von unter 0,2 % entspricht. Es konnte zudem eine spektrale Analyse der Temperaturverteilung bestimmt werden, die die Temperatursteigerung an der Lasereinwirkzone darstellt.

Weiterführende Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen dem Strahl eines Yb-Faserlasers und einem Plasmalichtbogen wurden in [Sch09] durchgeführt. Die Ergebnisse legen den Effekt nahe, dass bei Hinzufügen eines Laserstrahls zu einem Plasmalichtbogenprozess es zu einer Abnahme der Lichtbogenspannung um maximal 3 V kommen kann. Untersucht wurden Stahl sowie Aluminiumwerkstoffe, wobei erste Ergebnisse zeigten, dass ein Effekt lediglich beim Schweißen von Aluminium beobachtet werden konnte. Es wird beschrieben, dass Lichtbogenschweißprozesse auf Stahlwerkstoffen von sich aus schon stabil auf der Bogenachse brennen. Bei Einschalten des Laserstrahls kommt es zu einem unruhigen Spannungsverlauf und einer Erhöhung der Lichtbogenspannung bis 0,5 V. Im Falle der Aluminiumwerkstoffe verringert sich schon bei geringen Laserleistungen die Lichtbogenspannung um bis zu 3 V, und es kam zu einem gleichmäßigen Spannungsverlauf.

Neben den experimentellen Versuchen wurde in [Sch09] die Simulation des Einflusses des Metaldampfes innerhalb des Prozesses dargestellt. Dazu wurde eine Grenzfläche zwischen Lichtbogen und Werkstück als „Einlass“ definiert. Dort strömt Metaldampf mit der Siedetemperatur von Eisen (3024 K) ein. Es konnte festgestellt werden, dass der Metaldampf eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit verursacht. Die Untersuchungen konnten direkt über dem Werkstück höhere Stromdichten prognostizieren. Zudem wurden Untersuchungen zum Einfluss eines vor- und nachlaufenden Wärmefeldes veröffentlicht. Dazu wurde eine koaxiale Systemtechnik entwickelt, die zu einem ringförmigen WIG-Verfahren einen Single-Mode Faserlaser hinzuschalten kann. Innerhalb des Variationsbereiches konnte der Laser wenige Millimeter aus dem Zentrum des Lichtbogens positioniert werden. Die Ergebnisse sind in [Ros09] dargestellt. Es wurde nachgewiesen, dass das Plasmaverhalten signifikant von der Position des Lasers abhängig ist. Dies legt den Schluss nahe, dass es sich um ein Temperaturfeldphänomen handelt. Bei den Untersuchungen wurde eine Laserleistung von 400 W auf einem Stahlsubstrat verwendet. Durch den Single-Mode-Laser kommt es schon bei diesen geringen Leistungen zur Ausbildung einer Dampfkapillare. Diese hat einen ungefähren Durchmesser von 25 μm und ist damit deutlich kleiner als die Lichtbogenwirkzone. Es wird erklärt, dass durch das Flächenverhältnis der entstehende

Metалldampf vernachlässigbar ist. Der Effekt wird somit mit dem entstehenden Temperaturfeld erklärt. Es kommt hierbei zu einer Spannungsabnahme von bis zu 2 V.

Der Effekt des Temperaturfeldes auf den Lichtbogen wird auch in den Arbeiten von Chen et al. erwähnt [Che08]. Der Versuchsaufbau ist dabei an die Untersuchungen von [Ste80] angelehnt. Es wird einseitig mit dem Laser und auf der gegenüberliegenden Oberfläche mit dem Lichtbogen gearbeitet. Die Untersuchungen fokussieren sich auf den Bereich vom Einschweißen bis hin zum Durchschweißen. Die sich einstellenden Effekte werden durch das Durchschweißen verstärkt, was mehr auf den Einfluss des Metалldampfes als auf das Temperaturfeld schließen lässt.

Aktuelle Ergebnisse von [Rei15] beschreiben die Superpositionierung der Einzelprozesse. Es wird festgestellt, dass die Aufschmelzvolumen der Einzelprozesse in Summe deutlich von den Aufschmelzvolumen des Hybridprozesses abweichen. Es kommt zu einem synergetischen Effekt, wodurch das Schmelzbad vergrößert wird und der Prozess energiereduziert betrieben werden kann, um dieselben Aufschmelzvolumen der Einzelprozesse zu erhalten. Darüber hinaus werden Ergebnisse zum Einfluss des hinzugeschalteten Laserstrahls gezeigt. Das Ergebnis vergleicht den Einfluss von CO₂ und Yb-Faserlaser auf die Lichtbogenspannung. Für beide Laser kann festgestellt werden, dass durch eine Steigerung der Laserleistung die Abnahme der Lichtbogenspannung größer wird. Dieser Effekt zeigt sich beim CO₂-Laser deutlicher als beim Yb-Faserlaser, was auch im Stand der Technik zu erwarten ist. Des Weiteren kommt es zur Zunahme der Streuung der Lichtbogenspannung. Der Effekt deckt sich mit der Aussage von [Sch10], dass auf Stahlwerkstoffen der stabilisierende Effekt nicht im Spannungsverlauf beobachtet werden kann.

Neben den Effekten der Einschweißtiefe wird in der Literatur auch der synergetische Effekt der Benetzungsverbesserung beschrieben. In [Ber06] wird durch Hinzuschalten eines Diodenlasers zu einem Lichtbogenprozess das Löten von Aluminium an Stahl realisiert, ohne die Zinkbeschichtung des Stahlbleches zu zerstören. Weiterführende Untersuchungen zeigen ein dazugehöriges Prozessfenster [Wil06]. Dies konnte ebenfalls für Anwendungen beim Magnesiumschweißen erreicht werden [Pet13]. Es zeigt sich, dass durch die Kombination beider Prozesse die Gesamtenergie des Prozesses reduziert werden kann und somit thermisch empfindliche Materialien prozesssicher gefertigt werden können. Darüber hinaus wurden auch Untersuchungen am Prozess des Laser-MIG-Schweißens für Aluminium-Stahl-Verbindungen durchgeführt. Dabei konnte ebenso wie beim Laser-Plasma-Verfahren eine stabilisierende Wirkung beobachtet werden. Mit weiteren Laser-MIG-Verfahren und deren Anwendung werden z.B. in [Tho04] zusätzliche Beispiele für Hybridverfahren gegeben. Es konnte gezeigt werden, dass ein Hinzufügen eines Laserstrahls unabhängig von der Strahlquelle zu einer Steigerung der

Prozessstabilität führte, was in einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit resultierte. Dieses Phänomen konnte zur Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit genutzt werden. Des Weiteren konnte auch ein stabilerer Prozessablauf und damit auch eine verbesserte Nahtqualität beobachtet werden.

2.4 Lichtbogen und Laserstrahl zum Aluminiumlöten

Im Karosseriebereich werden aktuell verstärkt Legierungen der 5000er und 6000er Serie gefügt. Zurzeit werden dafür hauptsächlich mechanische Fügeverfahren (Schrauben, Nieten, Clinchen), das Kleben und unterschiedliche Schweißprozesse (Lichtbogenverfahren, Strahlschweißverfahren, Widerstandspunktschweißen) eingesetzt [Ost07]. Grundsätzlich kommen auch (Hart-)Lötverfahren als Fügetechnik für Aluminiumlegierungen in Frage. Als Alternative zu mechanischen Fügeverfahren bieten sie als Vorteil vor allem durchgehende Nähte mit einer erhöhten Steifigkeit und Dichtheit. Bei optimaler Ausführung können, ähnlich wie beim Hartlöten von Stahlfeinblech, ein ansprechendes Nahtaussehen (für den Einsatz im Sichtbereich) und reduzierte Nacharbeit erwartet werden. Im Vergleich zu klebetechnischen Lösungen ist insbesondere die in der Regel bessere Alterungsbeständigkeit der Lötverbindung zu nennen [Alu99]. Gegenüber Schweißverfahren erzielen sie ebenso akzeptable Festigkeiten bei geringerem Wärmeeintrag und somit geringerer Beeinflussung der Gefügestruktur der Grundwerkstoffe und signifikant reduziertem Verzug [Sch03]. Zur Realisierung der potentiellen Vorteile dieser Prozesse wurden bereits zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt, wobei bislang überwiegend Verfahren zur Anwendung kamen, die den Einsatz von Flussmittel erfordern. Das Laserstrahlhartlöten bietet die Möglichkeit eines schnellen (typischerweise 2 m/min), wärme- und folglich auch verzugsarmen Prozesses. Der Lotwerkstoff wird durch die lokale Energieeinbringung des unfokussierten Laserstrahls aufgeschmolzen. Das Hartlöten hat dabei gegenüber dem Schweißen den Vorteil, dass die Arbeitstemperatur niedriger und dadurch bedingte thermische Spannungen geringer sind. Darüber hinaus werden Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Dichtheit der Naht besser gewährleistet [Bob07]. Als weiterer wichtiger Vorteil des Lötens mittels eines Laserstrahls ist auch die im Vergleich zu lokalen Lichtbogenhartlötprozessen hohe Prozessgeschwindigkeit zu nennen, welche zu einem geringeren Wärmeeintrag und folglich zu einer geringeren Grundwerkstoffbeeinflussung (Entfestigung bei Aluminiumlegierungen [Ost07]) führt.

Diesen Vorteilen steht der Nachteil des Erfordernisses von Flussmittel zur Oberflächenaktivierung gegenüber. Der Laserstrahl ist alleine nicht in der Lage, die Oxidschicht des Aluminiums aufzubrechen und so eine hinreichende Benetzung zu gewährleisten. Es ist daher üblicherweise ein erhöhter Aufwand durch zusätzliche Prozessschritte zum Auftragen sowie zum Entfernen des Flussmittels nach dem

Hartlötprozess notwendig [Vol06]. Die Notwendigkeit des Flussmitteleinsatzes beim Laserstrahlhartlöten ist in der thermisch sehr stabilen Al_2O_3 -Aluminiumoxidschicht (Schmelzpunkt: 2045°C) [Alu97] zu sehen, die die Oberfläche der Fügepartner bedeckt. Die passivierende Eigenschaft der Oxidschicht wird durch das Pilling-Bedworth-Verhältnis angegeben [Pil23]. Das Verhältnis wird wie folgt berechnet:

$$PBF = \frac{\text{Volumen pro Metallatome im Oxid}}{\text{Volumen pro Metallatom im Metall}} \quad (2-11)$$

Durch Berechnung dieses Faktors können Aussagen über passivierende Eigenschaften des Materials getroffen werden. Ein passivierender Effekt stellt sich nur für Verhältnisse > 1 ein. Bei Verhältnissen < 1 können durch Zugspannungen Risse im Oxid entstehen, was unter Sauerstoffatmosphäre zu Neuoxidation führt [Men97]. Die Verhältnisse für Aluminium bzw. Magnesium sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Pilling-Bedworth-Verhältnisse

Metalloxid	Al_2O_3	MgO
Pilling-Bedworth-Verhältnis	1,28	0,81

Insbesondere wird dieser Effekt beim Ofenlöten betrachtet. In [Loh14] wird in diesem Zusammenhang festgehalten, dass, umso kleiner das Verhältnis ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für Risse in der Oxidschicht. Es werden Vermutungen geäußert, dass durch Zumischung von Magnesium die Benetzbarkeit beim Ofenlöten verbessert werden kann. Hinweise auf diesen Zusammenhang können [Dor07] entnommen werden.

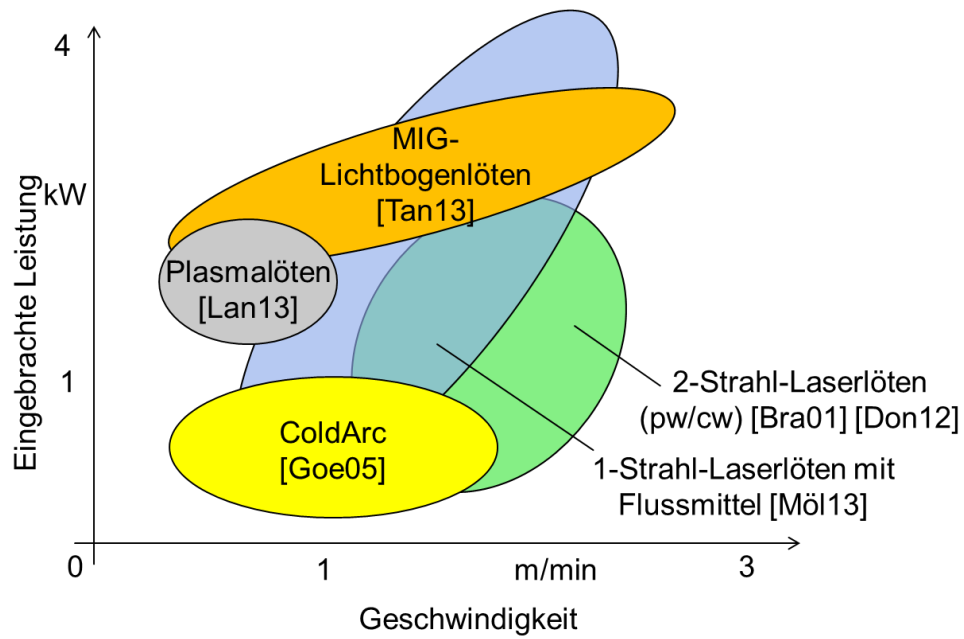
Um einen direkten Kontakt zwischen Lot und Grundwerkstoff zu gewährleisten und so eine Benetzung des Grundwerkstoffes mit dem Lot zu ermöglichen, ist es erforderlich, diese Oxidschicht zu entfernen bzw. zumindest aufzubrechen [Klo04]. Bei magnesiumhaltigen Aluminiumlegierungen wird dies durch noch stabilere MgO-Bestandteile in der Deckschicht weiter erschwert. Abgesehen von gesundheitlichen Aspekten ist durch den Einsatz von Flussmitteln eine verstärkte Verschmutzung der Anlagentechnik zu verzeichnen [Goe08].

Erste Ansätze zum Laserstrahlhartlöten ohne Flussmittel werden in [Klo04] beschrieben. In dem von den Autoren vorgeschlagenen kombinierten Laserprozess wird ein pulsierender (pw) Laserstrahl mit hoher Pulsintensität zur so genannten thermischen Oberflächenaktivierung mit dem Ziel einer Verbesserung der Benetzung des Grundwerkstoffes mit dem Zusatzwerkstoff eingesetzt. Ein zweiter, kontinuierlicher (cw) Laserstrahl mit hoher Leistung wird zur Erzeugung der erforderlichen Arbeitstemperatur für den eigentlichen Lötprozess verwendet [Klo04].

Als Alternative zum Laserstrahlhartlöten haben sich Lichtbogenverfahren in der Industrie größere Anwendungsbereiche erschlossen [Kil06]. Die Vorteile liegen hier in der Regel im Entfall des Flussmitteleinsatzes in der Prozesskette, einer besseren Spaltüberbrückbarkeit sowie in den geringen Investitionskosten. Einzelne Forschungsarbeiten beschäftigen sich zur Zeit mit der Weiterentwicklung flussmittelfreier lokaler lichtbogenbasierter Aluminiumlötprozesse. Die Reinigung der Oberfläche geschieht primär durch die oberflächenreinigende Wirkung des Lichtbogens bei positiv gepolter Elektrode. Bei den lokalen Prozessen zum Löten von Aluminiumlegierungen kommt dem MIG-Lichtbogenhartlöten derzeit die größte Bedeutung zu [Mue95]. Neben der Ausnutzung des Reinigungseffektes liegen weitere Vorteile in der direkten Zuführung von Lotwerkstoff über den Lichtbogen. Durch die Einstellung der Länge des Lichtbogens kann der Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff genau auf die Fügeaufgabe abgestimmt werden. Neuere Ansätze zum Hartlöten von Aluminium sind besonders wärmearme, geregelte MIG-Prozesse wie z.B. ColdArc und CMT [Goe05]. Ein ebenfalls eingesetztes Verfahren ist das WIG-Löten, bei dem der Zusatzwerkstoff als Kaltdraht zugeführt wird.

Alle lichtbogenbasierte Verfahren haben als gemeinsamen Vorteil den Entfall von Flussmittel in der Prozesskette, ermöglichen aber im Vergleich zum Laserstrahlhartlöten nur geringe Prozessgeschwindigkeiten ($< 0,5 \text{ m/min}$) und eine damit einhergehende vergleichsweise höhere Wärmebelastung des Bauteils sowie folglich auch stärkere Verzüge.

Durch den Einsatz hybrider Verfahren können auch beim Fügen Synergieeffekte erzielt werden. Beim Plasma-MIG-Löten soll durch eine koaxiale Anordnung von MIG-Lichtbogen und Plasmalichtbogen zusätzlich zur Erhöhung der Geschwindigkeit eine stabilisierende Wirkung auf beide Lichtbögen eintreten. Auch eine sequentielle Anordnung beider Prozesse wird vorgeschlagen. Es können mit beiden Anordnungen höhere Fügegeschwindigkeiten erreicht werden, beim Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen typischerweise $1,5 \text{ m/min}$ bis 3 m/min [Ala07]. Nachteilig ist allerdings, dass beide Prozesse einen relativ großen Wärmeeintrag bewirken und damit die Wärmebelastung des Grundwerkstoffes steigt. Ein weiterer koaxialer Prozess ist das Laser-Plasma-Hybridschweißen, das für das Schweißen von Aluminium-Stahl-Mischverbindungen bereits realisiert wurde [Vol04]. Es zeigte sich eine Stabilisierung des Lichtbogens auch bei höheren Fügegeschwindigkeiten (um 3 m/min). Der Stand der Technik bietet nur eine geringe Anzahl an Verfahren die sich mit Aluminiumlöten beschäftigen. Die genannten Verfahren sind in Abbildung 2-3 bezüglich der in der Literatur beschriebenen Geschwindigkeits- sowie Leistungsbereiche eingeordnet dargestellt.



Möller 2015

BIAS ID 152401

Abbildung 2-3: Vergleich der Verfahren zum Löten von Aluminium

3 Zielsetzung

Die Steigerung von Prozesseffizienz oder der Prozesstoleranz ist eine Möglichkeit, die stetig wachsenden Anforderungen an moderne Fügeverfahren zu erfüllen. Diese Anforderungen sind durch kurze Taktzeiten und möglichst flexible Fügeaufgaben bei Leichtbaustrukturen aus Aluminium gefragt. Die Verwendung eines kombinierten Verfahrens aus Laser und Lichtbogen verbindet die Vorteile der Einzelprozesse und schafft durch Synergieeffekte einen hocheffizienten Prozess hinsichtlich Robustheit und Geschwindigkeit. In vielen Forschungsarbeiten wurden diese Effekte bestätigt, allerdings konnte der dominierende Mechanismus bisher nicht eindeutig identifiziert werden. In der Literatur werden unterschiedliche Wechselwirkungszonen betrachtet. Zum einen wird eine direkte Beeinflussung des Lichtbogens durch das Durchstrahlen mit dem Laser gezeigt. Diese soll nach neuen Erkenntnissen vernachlässigbar klein sein. Zum anderen wird der Einfluss von Metaldampf diskutiert, der durch eine deutlich niedrigere Ionisationsenergie den Lichtbogen leitfähiger und dadurch stabiler macht. Weitere Arbeiten gehen von einer Ursache auf der Werkstoffoberfläche aus. Ein lokales Temperaturfeld soll dabei die Austrittsarbeit der Elektronen reduzieren und so den Lichtbogen beeinflussen. Um den dominierenden Mechanismus zu identifizieren, wird die Lichtbogenspannung analysiert. Durch die Identifizierung eines dominierenden Effektes kann das Verständnis und die Beherrschung des Prozess verbessert werden.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Identifizierung des laserinduzierten Einflusses beim Laser-Plasma-Hybridverfahren auf Aluminiumbasiswerkstoffen. Es soll die Hypothese geklärt werden, dass der dominierende Mechanismus zur Beeinflussung und Stabilisierung des Lichtbogens einer thermisch induzierten Wechselwirkung an der Oberfläche folgt. Durch die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf das Aluminiumlöten soll das Verfahren diskutiert und im Vergleich zu industriellen Lötverfahren eingeordnet werden.

4 Experimentelles

4.1 Werkstoffe und Probengeometrie

Bei den in den Versuchen eingesetzten Werkstoffen handelt es sich um handelsübliche Aluminiumlegierungen. Untereinander unterscheiden sie sich primär in der Zusammensetzung. Die Auswahl der Legierungen wurde auf Basis der Unterschiede in der thermischen Leitfähigkeit sowie in der Ausbildung und Zusammensetzung der natürlichen vorhandenen Oxidschicht getroffen. Daher kamen die Legierungen EN AW-6082, EN AW-5083 sowie Reinaluminium zum Einsatz. Im Folgenden werden die Zusammensetzungen der verwendeten Legierungen aufgelistet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zusammensetzung der verwendeten Aluminiumlegierungen [Asm93]

EN AW - 1050A (Al99,5)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bemerkung	Andere Elemente
0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	in Gew. %	0,03

EN AW - 5083 (AlMg4,5Mn)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bemerkung	Andere Elemente
0,4	0,4	0,1	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	in Gew. %	0,15

EN AW - 6082 (AlMgSi1)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bemerkung	Andere Elemente
0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	0,2	0,1	in Gew. %	0,15

Die wichtigsten Eigenschaften der Legierungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Materialeigenschaften [Asm93]

	EN AW - 1050A (Al99,5)	EN AW - 5083 (AlMg4,5Mn)	EN AW - 6082 (AlMgSi1)
Dichte in g/cm ³	2,7	2,66	2,70
Erstarrungsbereich °C	646-657	574-638	585-650
Elektr. Leitfähigkeit MS/m	34-36	16-19	24-32
Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	210-220	110-140	170-220
Therm. Längenausdehnungs-Koeffizient 10 ⁻⁶ /K	23,5	24,2	23,4
Elastizitätsmodul kN/mm ²	70	70	70

Die Auswahl der Werkstoffe wurde unter anderem aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitung getroffen. So kann verdeutlicht werden, in wie weit ein thermischer Effekt den Lichtbogen beeinflusst. Die Unterschiede der physikalischen Eigenschaften können nur durch eine Änderung der Legierung erreicht werden und damit auch eine Modifikation der Oberfläche. Dies wird in der Zusammensetzung der Oberfläche, bedingt durch unterschiedliche Magnesiumgehalte, deutlich (Tabelle 5).

Tabelle 5 – Zusammenfassung Reaktionsprodukt auf der Aluminiumoberfläche [nach Zäh10]

Quelle	Legierungselemente in Gew. % in Al	Vergleichbare Legierung bezogen auf Mengenanteile	Atmosphäre	Reaktionsprodukt
[Gra76]	4,6 % Mg 1,55 % Mg	EN AW-5083 EN AW-6082	Sauerstoff	MgO + amorphes Al_2O_3
[Hag83]	2 % Mg 4 % Mg 6 % Mg 8 % Mg 10 % Mg 12 % Mg	EN AW-6082 EN AW-5083 EN AW-5083 EN AW-5083 EN AW-5083 EN AW-5083	trockene Luft	amorphes Al_2O_3 + MgO an Grenzfläche Atmosphäre MgAl_2O_4 an Grenzfläche Atmosphäre
[Hun56]	Al-Legierung	EN AW-1050	Luft	amorphes Al_2O_3
[Lee85]	1,8 % Mg	EN AW-6082	Sauerstoff	Al_2O_3 + MgO bei $t > 270$ min: MgAl_2O_4 zwischen Oxid und Metall
				MgO + amorphes Al_2O_3
[Sco99]	4,7 % Mg	EN AW-5083	Luft	amorphes Al_2O_3 + MgO + metallisches Al an der Oberfläche
	4 % Mg			teilweise Kristallisation zu Al_2O_3 + MgO außen
[Ten00]	4 – 5 % Mg 0,2 – 0,5 % Mn < 0,2 % Si < 0,35 % Fe	EN AW-5083	Luft Ar + 5% O_2 Ar + 1% O_2 CO_2	MgO
	0,8 – 1,3 % Mg 1 – 1,5 % Mn < 0,3 % Si < 0,7 % Fe	EN AW-6082		MgAl_2O_4

Es wird deutlich, dass es bei einer Legierung EN AW-5083 zur Ausbildung von MgO-Schichten kommt. Im Gegensatz dazu bilden die Legierungen EN AW-1050 und EN AW-6082 Al_2O_3 bzw. MgAl_2O_4 -Schichten aus.

In dieser Arbeit sind Proben mit den Abmaßen 150 mm x 50 mm x 3 mm verwendet worden. Diese wurden mittels einer Tafelschere MSB 100 der Firma Schechtl auf die gewählte Geometrie geschnitten. Die Bearbeitung mittels Laserstrahl oder Plasmalichtbogen erfolgt mit der Walzrichtung.

Zur Umsetzung der Blindlötungen werden Proben mit Blechdicken von 10 mm verwendet. Zudem ist der Unterschied der Schmelztemperatur zwischen der Legierung EN AW-6082 und dem Zusatzwerkstoff AlSi12 $\varnothing = 1,6$ mm zu gering, um eine Lötung durchzuführen. Daher wird für die Lötversuche der Werkstoff EN AW-6016 (AlSi1,2Mg0,4) eingesetzt. Die Schmelztemperaturen der Werkstoffe sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Schmelztemperaturen der Werkstoffe [Fis87]

Werkstoff	Schmelzbereich
EN AW-6082	585-650 °C
EN AW-6016	610-655 °C
AlSi12	573-585°C

4.2 Koaxiale Beeinflussung

Zur Untersuchung des Einflusses des Laserstrahls auf die Lichtbogenspannung kommen zwei unterschiedliche Aufbauten zum Einsatz. Bei der koaxialen Bearbeitung wird der Laser koaxial zum Lichtbogen auf dem Blech positioniert (Abbildung 4-1).

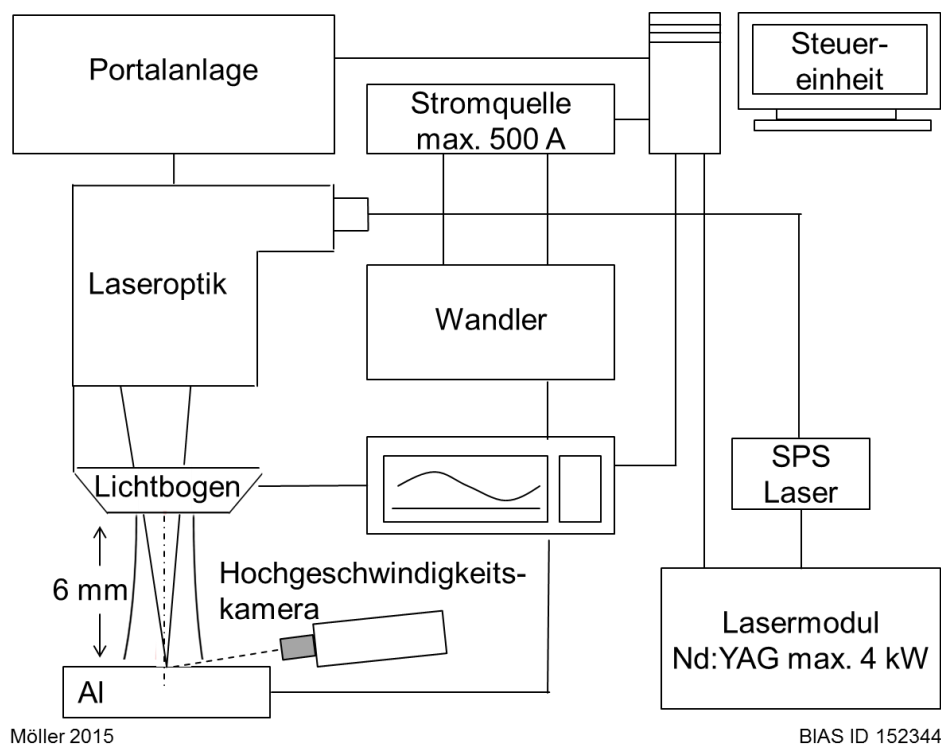
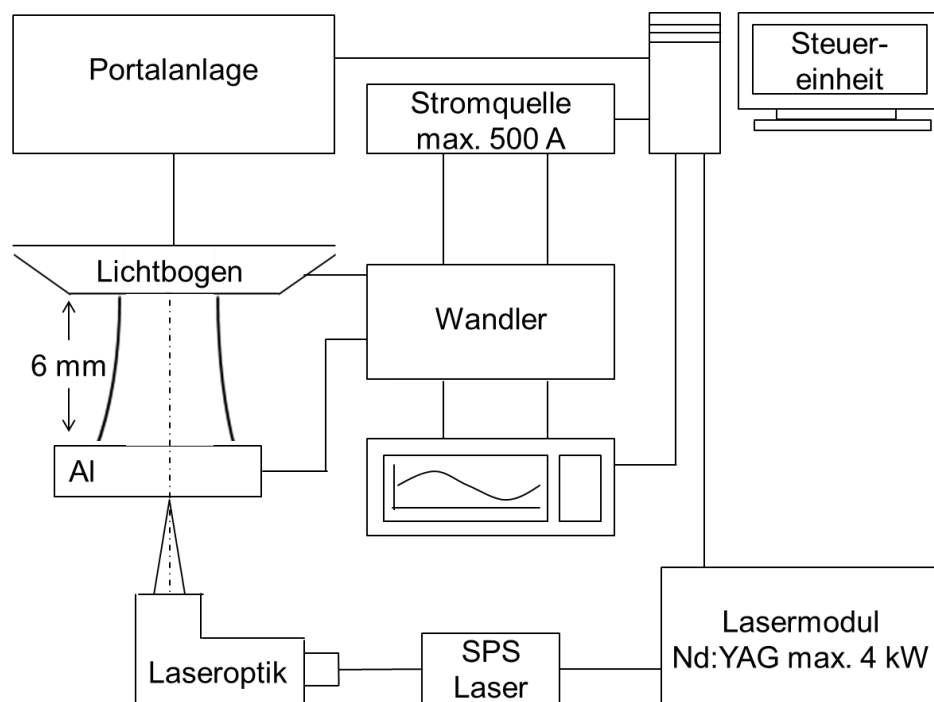


Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau der koaxialen Konfiguration

Beide Prozesse werden mittels eines Triggersignals Abbildung 4-17 aus dem Steuerprogramm zeitlich gekoppelt. Die Positionierung des Gesamtsystems erfolgt durch das Portalsystem REIS-Laserroboter RLP16-FT.

4.3 Beidseitige Beeinflussung

Neben der coaxialen Konfiguration wird ein Aufbau zur beidseitigen Bearbeitung verwendet. Der Laser wird dabei vom Lichtbogen entkoppelt und auf der Probe positioniert. Dafür ist ein Aufbau entwickelt worden, der eine beidseitige Zugänglichkeit des Bleches gewährleistet. In Abbildung 4-2 ist der schematische Aufbau gezeigt. Der Aufbau und die Steuerung werden analog zur coaxialen Konfiguration verwendet. Das Ziel dieser Konfiguration ist, den direkten Einfluss des Lasers innerhalb des Lichtbogens herauszunehmen und nur den Einfluss einer lokalen Wärmequelle unterhalb der Probe und damit auch unterhalb des Lichtbogens zu realisieren.



Möller 2015

BIAS ID 152343

Abbildung 4-2: Aufbau und typisches Nahterscheinungsbild der beidseitigen Bestrahlung

4.4 Messsysteme

4.4.1 Lichtbogenspannungsmessung

Zur Aufzeichnung der Spannungsverläufe wird der Transientenrekorder Multi-Channel Waveform Analyzer 2580P der Firma Nicolet Technologies B.V. verwendet, der die analogen Signale mit einer Genauigkeit von 100 ppm des im Transientenrekorder maximal eingestellten Spannungsbereichs aufzeichnen kann. Bei den Untersuchungen wurde ein Bereich bis 50 V eingestellt. Die Messungenauigkeit beträgt daher 0,5 mV. Um die von der Stromquelle bereitgestellten Ströme in ein messbares Signal umzuwandeln, wird zwischen Stromquelle und Rekorder ein Messwandler (Abbildung 4-3) eingesetzt. Die Spannung wird zwischen der Befestigung des Rückleiters der Stromquelle und oberhalb der Isolationshülse (Abbildung 4-5) gemessen. Die Strommessung wird

zwischen Rückleiter und Stromquelle durchgeführt. Der Einsatz eines Messwandlers ist notwendig, um die auftretenden Ströme von bis zu maximal 500 A und Spannungen von $> 30\text{ V}$ für eine Aufzeichnung mit dem Transientenrekorder aufzubereiten.

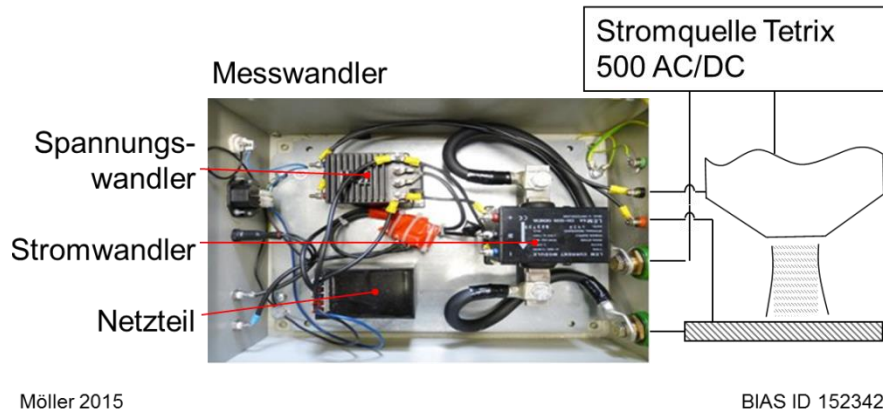


Abbildung 4-3: Messbox

Zur Umrechnung der Ströme und Spannungen sind im Vorfeld Messungen durchgeführt worden, auf denen basierend die hier durchgeführten Messungen umgerechnet werden können. Zum Umwandeln der Ströme wird ein Stromwandler LEM LT 505 T eingesetzt. Der Primärstrom (z.B. Schweißstrom), der durch den Stromwandler fließt, wird in einem Übersetzungsverhältnis (Ratio) von 1 : 5000 verringert.

Bei der Messung der Spannung wird ein Spannungswandler LEM CV 3-200 eingesetzt. Dieser arbeitet mit einem Wandlungsverhältnis von 1 : 20. Die Spannung wird hier direkt in die Messspannung umgewandelt.

Zur Sicherstellung, dass alle Geräte zeitlich aufeinander abgestimmt sind, wird durch die Steuerung der Portalanlage der Firma Reis Robotics GmbH & Co. KG ein Triggersignal für den Transientenrekorder, das Plasma und die Hochgeschwindigkeitskamera erzeugt. Das Triggersignal wird auch auf dem Transientenrekorder aufgezeichnet und kann so optimal zur Auswertung der Spannungskurven genutzt werden.

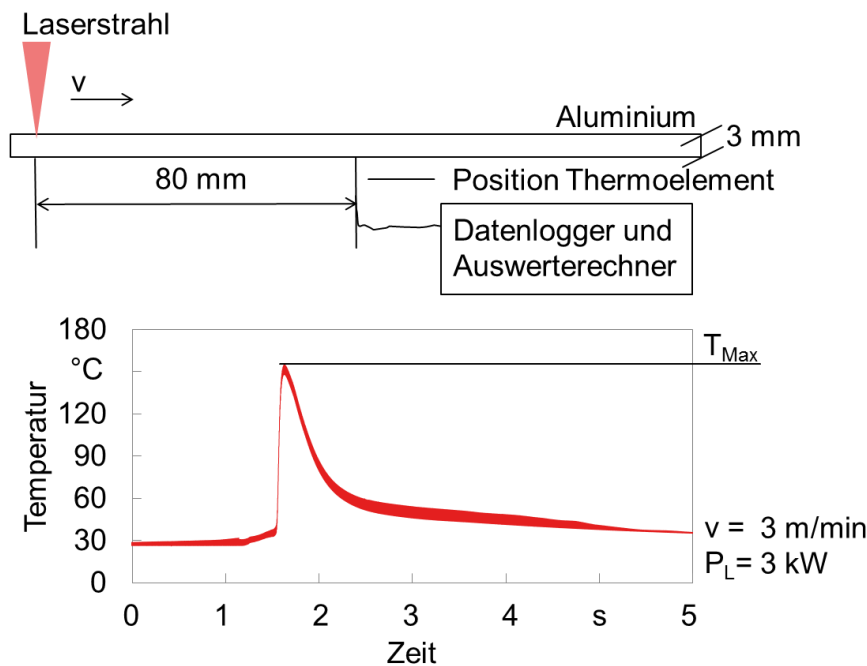
4.4.2 Hochgeschwindigkeitskinematografie

Zur videoanalytischen Auswertung der Versuche wird der Prozess mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera des Typs Vision Research Phantom 5.1 der Firma Vision Research Inc. mit einer Maximalfrequenz von 90 kHz bei einer Auflösung von 640 x 480 Pixel aufgezeichnet. Die Auswertung der Daten erfolgt mit der Software Phantom Camera Control in der Version 8.1.607.0-C.

4.4.3 Temperaturmessung

Die Bestimmung der Temperatur erfolgt mittels Thermoelement der Firma TC Direkt. Bei der Durchführung der Experimente kommt ein Element des Typs K, Nickel-Chrom / Nickel, zum Einsatz. Der Arbeitsbereich liegt zwischen -270 °C und 1300 °C bei einer

Messgenauigkeit von 1,5 K. Darüber hinaus hat dieser Typ Thermoelement eine Empfindlichkeit von $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ und eignet sich daher für Präzisionstemperaturmessungen. Die verwendeten Messfühler sind gemantelt und können, ohne die thermischen Eigenschaften zu verlieren, direkt an die zu messende Position gebogen werden. Durch eine elektrische Isolation der Messspitze können Erdungskurzschlüsse vermieden werden. In Abbildung 4-4 ist der schematische Versuchsaufbau und ein typischer Temperatur-Zeitverlauf gezeigt.



Möller 2015

BIAS ID 152390

Abbildung 4-4: Schematischer Aufbau der Temperaturmessung und typischer Temperatur-Zeitverlauf

Die Thermoelemente werden an der Unterseite der Probe mittig zur Prozesszone positioniert. Über eine geringe Federkraft kann der Kontakt zum Werkstück sichergestellt werden. Mittels des Datenloggers OMB-DAQ-3000 werden die Analogsignale digitalisiert. Dieser wandelt das Signal mit einem 16-Bit A/D-Wandler mit 1 MHz. Zur Auswertung wird die Maximaltemperatur von jeweils drei Messungen gemittelt.

Bei den Blindlötversuchen werden Bleche mit $t = 10 \text{ mm}$ verwendet. Das Thermoelement wird dabei durch eine Bohrung 1 mm unterhalb der Blechoberfläche fixiert. Die Position ist darüber hinaus identisch mit der oben beschriebenen Konfiguration.

4.5 Versuchseinrichtung

4.5.1 Laserstrahlquelle

Bei den experimentellen Untersuchungen wird ein Nd:YAG-Laser der Firma Trumpf (HL 4006D) mit einer maximalen Laserleistung von 4 kW eingesetzt, welcher über eine Faser mit einem Kerndurchmesser von $600 \mu\text{m}$ zum Brennerkopf geführt wird. Das Faserende

wird mittels einer Kollimiereinheit (Brennweite 200 mm) sowie einer Fokussiereinheit (Brennweite 200 mm) auf der Blechoberseite abgebildet. Durch computerunterstützte Verstellung der Linsen können unterschiedliche Foki bei konstanter Intensitätsverteilung eingestellt werden.

4.5.2 Lichtbogenquelle

Die benötigten Ströme für den Plasmalichtbogen werden von der Stromquelle des Typs Tetrax 500 AC/DC der Firma EWM geliefert. Diese Stromquelle ermöglicht, die Ströme stufenlos im Bereich von 0 – 500 A zu variieren. Im Wechselstrombetrieb (AC) kann über die Einstellung der Balance kann das Verhältnis der positiven bzw. negativen Halbwellen eingestellt werden. Plasmastromquellen sind stromgeregelt, was bedeutet, dass durch Anpassung der Lichtbogenspannung der eingestellte Schweißstrom konstant gehalten wird.

4.5.3 Ringelektrodenbrenner

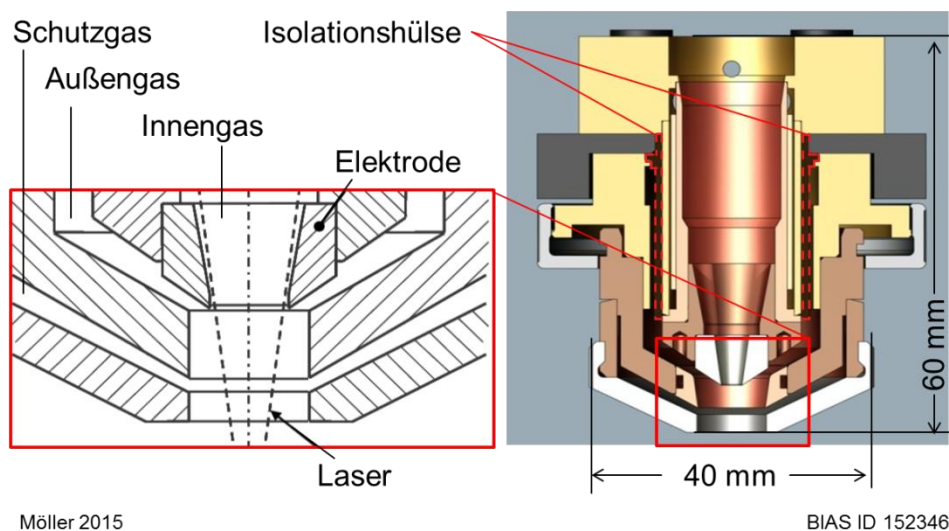


Abbildung 4-5: Prinzipdarstellung des Brenners [Bild bereitgestellt von der Firma Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH & Co. KG]

Zur experimentellen Durchführung wurde ein neuartiger Brennerkopf verwendet. Die konstruktive Auslegung und Umsetzung des Plasmabrenners wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH & Co. KG sowie EWM Hightech Welding GmbH durchgeführt. Die Optiken wurden von Scansonic GmbH gefertigt und bereitgestellt. In Abbildung 4-5 rechts wird der Brenner schematisch im Querschnitt gezeigt.

Zur Integration des Plasmaprozesses in den Laserstrahlprozess ist am unteren Ende der Laseroptik der Brenner mit der Ringelektrode befestigt, über die das Plasma gezündet wird. Der für diesen Prozess entwickelte Brennerkopf ist als Prinzipdarstellung in Abbildung 4-5 links gezeigt. Er verfügt über drei Gaszuführungen, von denen das

Innengas, auch Plasmagas genannt, bei einer Zündung ionisiert wird und einen stromübertragenden Lichtbogen bildet. Über das Außengas lässt sich der Plasmalichtbogen einschnüren bzw. fokussieren. Das Schutzgas schirmt den Prozess von der Umgebung ab und dient der Vermeidung von Oxidation. Die Durchflussmengen der Gase werden dabei einzeln über externe Ventile gesteuert. Zusätzlich befinden sich im Brennerkopf zwei Kühlwasserkreisläufe.

Wichtig bei der Auslegung des Brennerprototyps ist das Kriterium der möglichst hohen Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Brennerkopfs, um verschiedene geometrische Variationen am Brenner durchführen zu können. Der Brenner kann die Variation der in Tabelle 7 aufgelisteten Parameter realisieren:

Tabelle 7: Konstruktive Variationen

Parameter	Variationsbereich
Gasdüsendurchmesser	3 mm bis 10 mm
Elektrorendurchmesser	3 mm bis 10 mm
Schutzgasdüsenabstand	0 mm bis 4 mm
Auswechselbare Isolationshüllen	3

Um beim Brennersystem eine möglichst lange Elektrodenstandzeit zu realisieren wird die Elektrode aus dotiertem Wolfram hergestellt. Durch seine hohe Schmelztemperatur wird Wolfram als Standardmaterial für Brenner beim Plasmaschweißen eingesetzt.

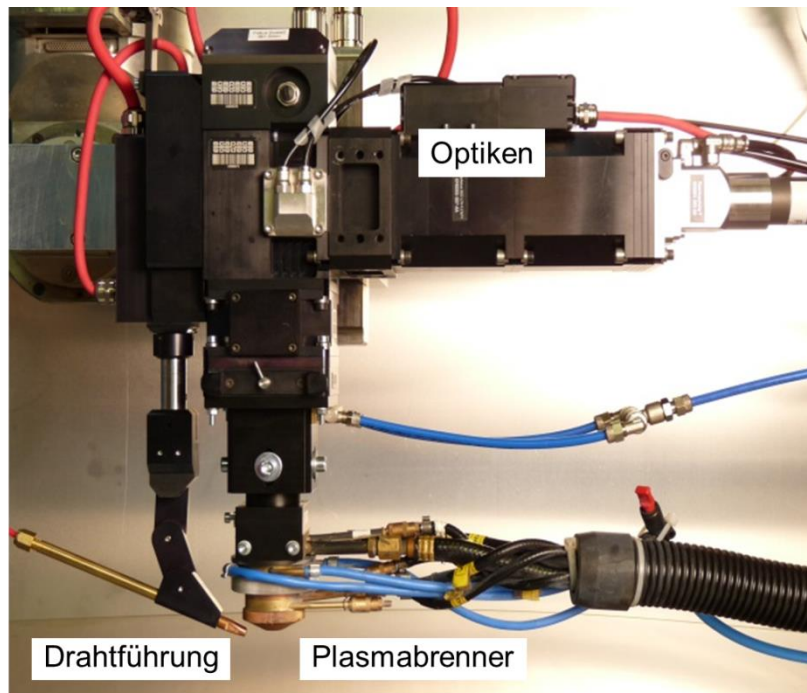


Möller 2015

BIAS ID 152347

Abbildung 4-6: Ringelektrode aus dotiertem Wolfram

In Abbildung 4-6 ist die Ringelektrode dargestellt. Weiter wurden noch zusätzliche Punkte wie eine optimierten Kühlung der Schutzgasdüse sowie eine massive Brennerverbindung zwischen Brenner und Optiken realisiert. Parallel wurde am kompletten Systemaufbau eine Nahtführung integriert. In Abbildung 4-7 wird der gesamte entwickelte Systemaufbau gezeigt.



Möller 2015

BIAS ID 152351

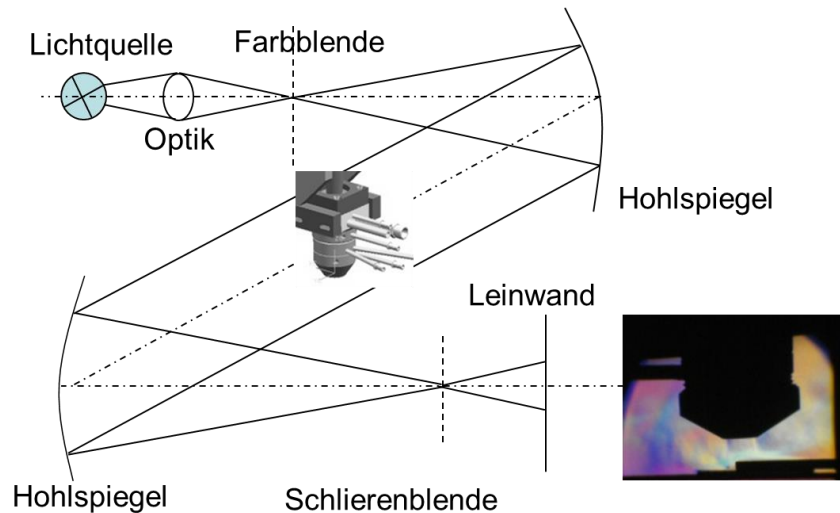
Abbildung 4-7: Laser-Plasma-Arbeitskopf

4.6 Absicherung der Durchführbarkeit

4.6.1 Schlierenmessung

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Gasabdeckung der Naht während des Prozesses sind Schlierenaufnahmen ohne Lichtbogen durchgeführt worden. Durch Adaption des Schlierenaufbaus an den jeweiligen Schweißprozess soll die Darstellung (Sichtbarmachung) der Gasströmungen während des Schweißprozesses ermöglicht werden (vgl. Abbildung 4-8). Als Lichtquelle wird eine Halogenglühlampe 12 V / 50 W mit justierbarem Reflektor inkl. Fokussieroptik verwendet. Des Weiteren werden zwei Hohlspiegel mit einem Durchmesser von 206 mm mit einer Brennweite von $f = 600$ mm eingesetzt. Der erste Hohlspiegel ist so angeordnet, dass er einen kollimierten Strahl erzeugt, der vom zweiten Hohlspiegel auf die Schlierenblende mit justierbaren Schneidkanten fokussiert wird. Zwischen den beiden Hohlspiegeln befindet sich das Objekt. Weiter besteht der Aufbau aus einer Lochblende sowie einer Abbildungslinse, die das Bild direkt auf der Kamera abbildet.

Durch die Dichteänderungen (Brechungsindexgradienten) im Strömungsfeld des gesamten Bereichs des Schweißprozesses kommt es zu einer Inhomogenität. Diese Inhomogenität bewirkt, dass ein Teil des Lichts an der Blende vorbei geleitet wird. In der Bildebene werden Schlieren sichtbar. Die hohe Empfindlichkeit macht es möglich, auch geringe Gasdurchflussmengen zu visualisieren.

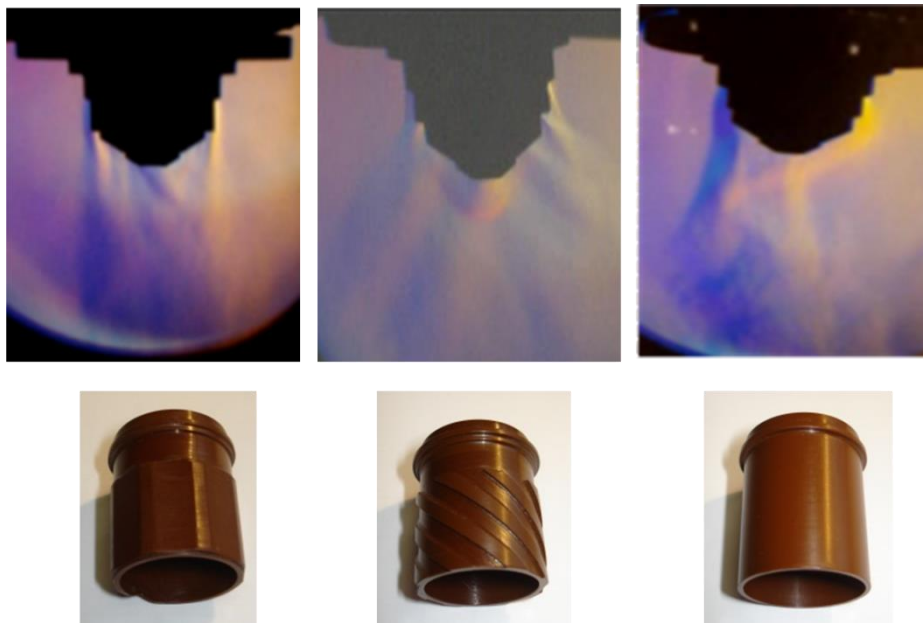


Möller 2015

BIAS ID 152348

Abbildung 4-8: Töpplerscher Z-Aufbau zur Erzeugung von Schlieren

Mit Hilfe dieses Aufbaus wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Isolationshülsen auf die Gasströmungen untersucht. Dazu war es notwendig, die unterschiedlichen Anströmgeometrien zu vermessen und die optimale Konfiguration für weitere Versuche festzulegen (Abbildung 4-9).



Möller 2015

BIAS ID 152349

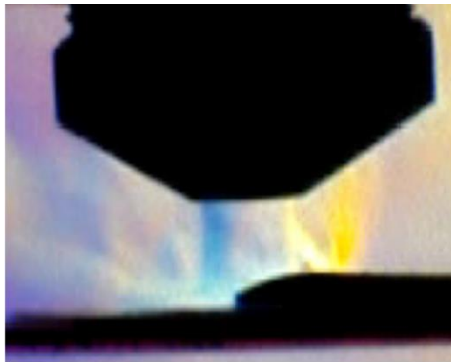
Abbildung 4-9: Variation der Isolationshülsen

In Abbildung 4-9 sind die unterschiedlichen Geometrien der Düsen sowie die zugehörigen Schlierenaufnahmen dargestellt. Deutlich ist hier ein Unterschied in der Laminarität des Gasstroms zu erkennen. Bei Düsengeometrie 1 kann über eine Strecke von 40 mm eine symmetrische Ausbildung des Gasflusses am unteren Ende der Düse beobachtet werden. Darüber hinaus zeigt sich eine optimale Laminarität bzw.

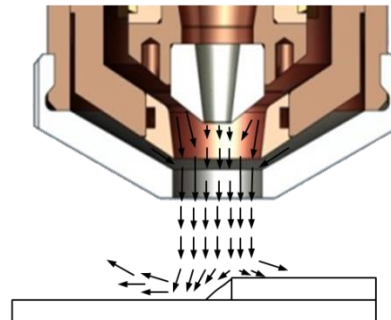
Gleichmäßigkeit des Gasflusses. Die Aussagen können auf Basis der Videoauswertung getroffen werden. Es zeigt sich ferner, dass eine optimale Gasabdeckung bei den Durchflussraten

- Innengas 0.5 l/min
- Außengas 12 l/min
- Schutzgas 12 l/min

gewährleistet werden kann. Wie in Abbildung 4-10 zu erkennen ist, weist diese Konfiguration eine sehr gute Gasabschirmung gegenüber der Umgebungsluft auf.



Möller 2015



BIAS ID 152350

Abbildung 4-10: Gasschutz gemessen (links) und basierend auf einer Videoanalyse schematisch (rechts) dargestellt

4.6.2 Absorptionsmessung der Laserstrahlung im Plasmalichtbogen

Zunächst wird das System auf die Eignung hin überprüft. Insbesondere bei der Anordnung des koaxialen Systems muss untersucht werden, ob der Laserstrahl direkt mit dem Lichtbogen wechselwirkt oder dieser Effekt ausgeschlossen werden kann. Dazu wird der Laserstrahl senkrecht zum Lichtbogen durch die Bogenachse geleitet. Als Elektroden werden zwei gegenüberliegende, gekühlte Ringelectroden verwendet. Der Abstand zwischen den Elektroden beträgt 6 mm. Der Lichtbogen wird während des Vorganges ein- und wieder ausgeschaltet. Über den gesamten Vorgang wird die Leistung des Lasers an einem hinter dem Lichtbogen geschalteten Leistungsmessgerät mitprotokolliert. Dazu wird ein Leistungsmessgerät 5000W-LP1-50 der Firma Ophir Optronics GmbH verwendet. Der Messwert wird dabei durch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf des Kühlwassers ermittelt. Das Gerät erreicht damit eine Genauigkeit von $\pm 5\%$. In Abbildung 4-11 ist der dafür verwendete Aufbau schematisch dargestellt.

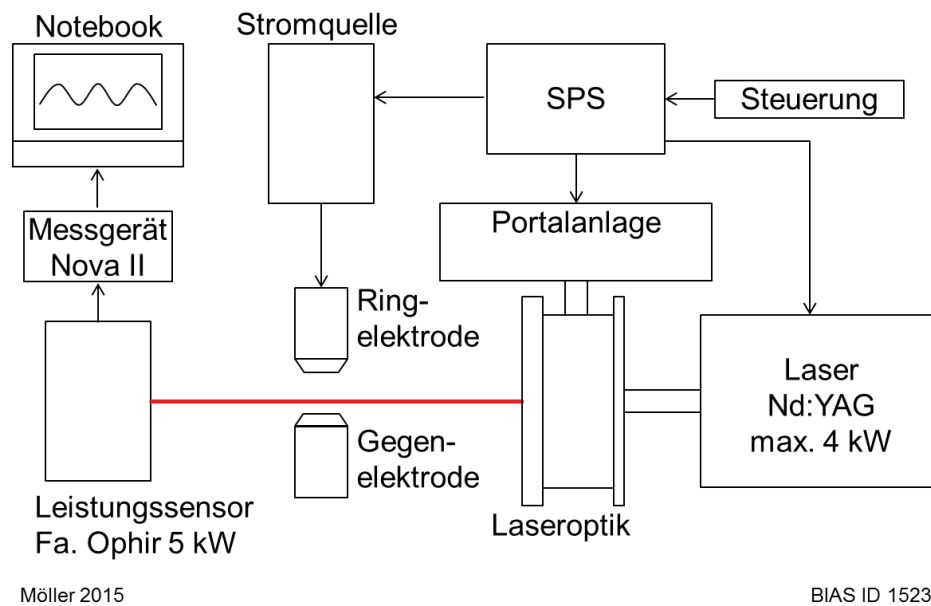


Abbildung 4-11: Prinzipieller Aufbau zum Ausschließen der direkten Wechselwirkung aus Laserstrahlung und Lichtbogen

Durch eine Variation der Leistungen von Laser und Lichtbogen wird der Effekt charakterisiert. Die aufgezeichneten Kurven zeigen keine Beeinflussung der gemessenen Laserleistung mit und ohne Plasma (Abbildung 4-12). Fotos zum Aufbau und feiner skalierte Diagramme zu den Messungen befinden sich im Anhang.

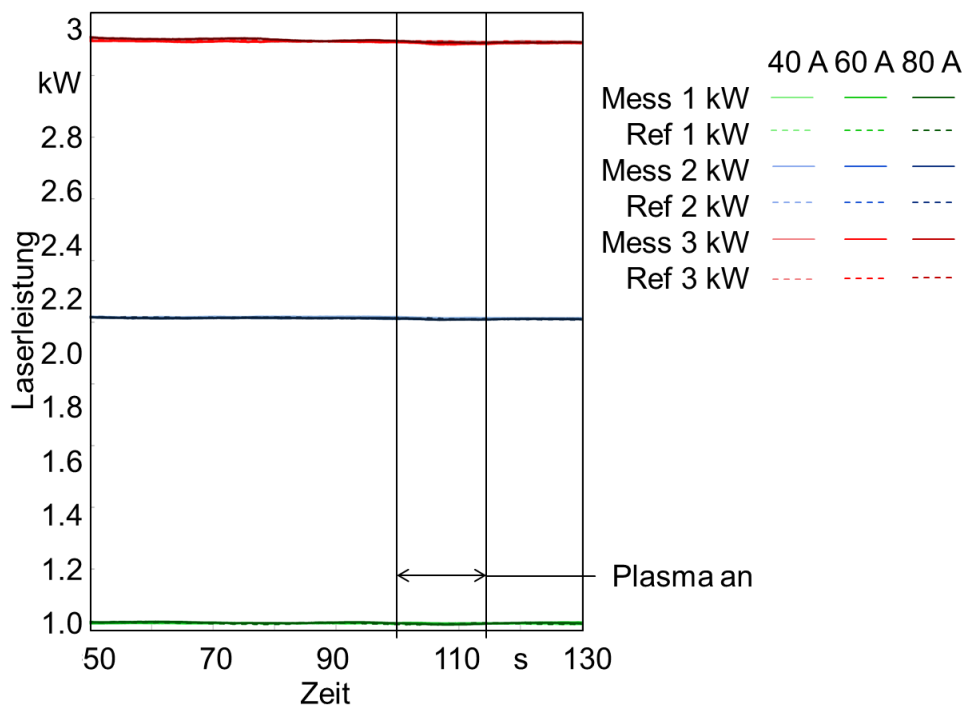


Abbildung 4-12: Transmissionsverhalten des Laserstrahls durch einen Plasmalichtbogen

Eine nähere Betrachtung der möglichen Effekte aus dem Stand der Technik bestätigt dieses. Bei der Durchstrahlung von Gasen kann das Phänomen der Photoionisation

vorkommen. Dabei wird angenommen, dass Photonen erst ab einer definierten Energie, der so genannten Ionisationsenergie, in der Lage sind, Elektronen aus dem Atomverbund herauszulösen und damit den Lichtbogen zu beeinflussen. Die Energie, welche durch den hier verwendeten Nd:YAG-Festkörperlaser aufgebracht werden kann, kann durch den unten aufgeführten Zusammenhang beschrieben werden:

$$f = \frac{c}{\lambda} \approx 281 \text{ THz}$$

$$E_{ph} = h \cdot f \approx 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,1167 \text{ eV}$$

Die Ionisationsenergie für Argon liegt bei 15,7 eV und liegt daher deutlich oberhalb der Energie, welche die Photonen des Laserstrahls besitzen. Die Energie reicht somit nicht aus, eine Photoionisation hervorzurufen. Ebenfalls kann durch diese Darstellung der optogalvanische Effekt ausgeschlossen werden. Hier werden die Elektronen durch die Photonen angeregt, allerdings wird dazu ebenfalls die Energie der Argonionisation benötigt. In beiden Fällen zeigt sich, dass der Lichtbogen nicht durch einen Laser mit genannter Wellenlänge ionisiert wird. Eine direkte Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Lichtbogen in koaxialer Konfiguration kann daher ausgeschlossen werden. Ein Vergleich der Messergebnisse von beidseitiger und einseitiger Konfiguration, hinsichtlich eines anderen Effekts, ist daher möglich. Im Stand der Forschung werden allerdings einige Arbeiten benannt, welche den optogalvanischen Effekt als Erklärungsansatz für die beobachteten Wechselwirkungen auf Aluminium benennen. In weiterführenden Arbeiten können die Thesen widerlegt werden [Emd14]. Neueste Arbeiten beschreiben [Sch09], dass der Effekt bei der Prozessstabilisierung im Hybrid-Verfahren nur geringfügige Auswirkungen hat und damit nicht der dominierende Mechanismus der Wechselwirkung sein kann. Dies deckt sich mit den in dieser Arbeit beobachteten Phänomenen und schließt diese als Wechselwirkungsmechanismen aus.

Der Compton-Effekt ist, wie oben beschrieben, eine direkte Wechselwirkung zwischen Photon und Elektron. Die Photonen treffen dabei auf ein freies oder auf ein Valenzelektron. Der Nachweis einer Wechselwirkung kann allerdings nur erfolgen, wenn die Laserstrahlung in der Größenordnung der Compton-Wellenlänge liegt. Verstärkt tritt dieser Effekt daher bei Gamma- oder Röntgenstrahlungen auf. Der hier verwendete Nd:YAG-Laser liegt mit seiner Wellenlänge von 1064 nm im Bereich der Infrarotstrahlung. Die resultierende Wellenlängenänderung kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\Delta\lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos(180^\circ)) = 4,86 \text{ pm}$$

$$\lambda' = \Delta\lambda + 1064 \text{ nm} = 1064,00486 \text{ nm}$$

Dies hat zur Folge, dass die Wellenlänge sich nicht signifikant ändert und hinsichtlich des Absorptionsverhaltens für die Betrachtung nicht relevant ist.

Des Weiteren können Aussagen zum Einfluss der inversen Bremsstrahlung gemacht werden. Dadurch, dass bei diesen Untersuchungen ein Niedrig-Temperatur-Plasma erzeugt wird, kann auch der Effekt der inversen Bremsstrahlung ausgeschlossen werden. In Schweißlichtbögen beträgt die Temperatur der Lichtbogensäule zwischen 10000 K und 25000 K, was, wie im Stand der Forschung bereits erwähnt, zu einer Abnahme der Laserleistung von $< 0,3 \%$ liegt [Ols59].

Neben dem Effekt der Ionisation wurden Einflüsse zum Ablenken des Laserstrahls untersucht. Der Laserstrahl würde bei einer Ablenkung nicht mehr zentrisch zum Lichtbogen positioniert sein. Der Kerr-Effekt hat bezüglich dieser Untersuchungen ebenfalls keine hohe Bedeutung. Dieser beschreibt die Einflussnahme einer elektrischen Spannung auf den Brechungsindex. Diese Änderung ist proportional zum Produkt der Kerr-Konstante und der Spannung zum Quadrat. Die Kerr-Konstante liegt bei $b_{\text{Argon}} = 2,2 \times 10^{-14} \text{ m V}^{-2}$ [Kie72]. Daher tritt dieser Effekt nur bei entsprechend hohen Spannungen auf.

Insgesamt kann daher festgehalten werden, dass der Aufbau zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Lichtbogen, Laser und Grundwerkstoff in coaxialer Konfiguration geeignet ist. Es konnte kein Einfluss der Laserstrahlung auf den Lichtbogen im hier untersuchten Bereich festgestellt werden.

4.6.3 Optische Stabilität des Prozesses

Neben der Spannungsabnahme kann auch die Einschnürung des Lichtbogens durch den Laser als ein Maß für die Prozessstabilisierung herangezogen werden. Zur Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden zunächst qualitativ Bildsequenzen aus den Sektionen ausgewählt und zur Auswertung mit der Software der Hochgeschwindigkeitskamera aufbereitet. Auf Grund der erwarteten Dynamik, welche der Plasmalichtbogen während einer AC-Periode von 130 Hz an der Ringelektrode aufweist, werden 1500 Bilder, die einer Zeit von ca. 0.375 s und damit ca. 50 Perioden entsprechen, überlagert. So kann der gesamte Ausbreitungsbereich des Lichtbogens in einem Bild erfasst werden. Die Auswertung erfolgt über die Software MatLab [Tho08].

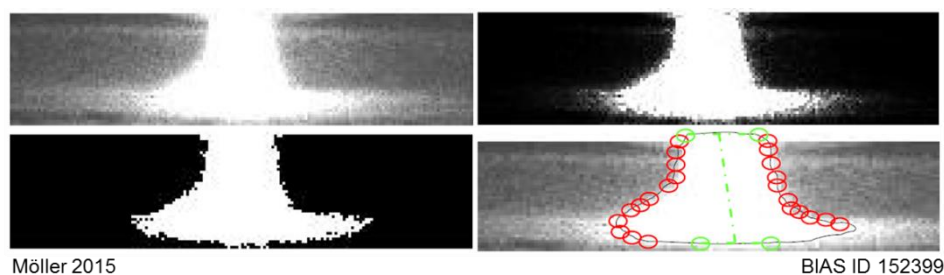
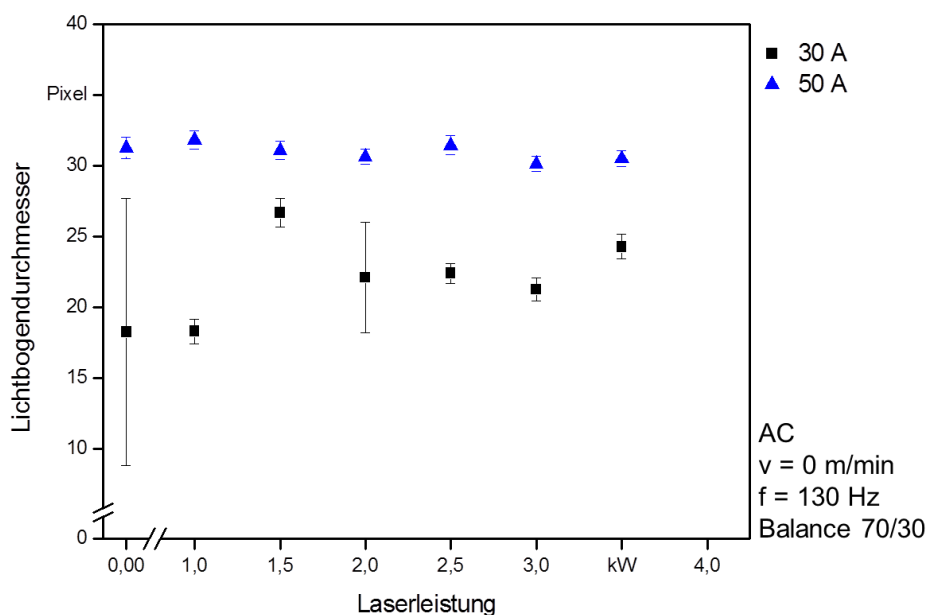


Abbildung 4-13: Exemplarische Auswertung der Hochgeschwindigkeitsanalyse zur Einschnürung des Lichtbogens

Die Bilder werden zunächst in ein Graustufenbild umgewandelt und hinsichtlich des Kontrastes und der Helligkeit angepasst. Anschließend wird aus diesem Bild ein binäres Bild erstellt und die Kanten des Lichtbogens über den Kontrast detektiert. Aus diesen Informationen können dann alle weiteren Werte errechnet werden. Diese Auswertung beschränkt sich auf die Fläche, den Durchmesser an 10 unterschiedlichen Punkten sowie der Länge und der Winkel des Lichtbogens. Da pro Sequenz 1500 Bilder ausgewertet werden sollen, ist diese Auswertung automatisiert. Am Ende einer Sequenz liefert die Zeitreihe der oben genannten charakteristischen Größen einen Mittelwert mit Vertrauensintervall (siehe Abbildung 4-13). Die Versuche sind mit einem Anteil der positiven Halbwelle von 70 % durchgeführt worden.



Möller 2015

BIAS ID 152354

Abbildung 4-14: Lichtbogendurchmesser über Laserleistung

In Abbildung 4-14 ist die Einschnürung des Lichtbogens gemäß der in Abbildung 4-1 erläuterten Systemtechnik in Abhängigkeit der Laserleistung dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass der Lichtbogen bei 50 A breiter erscheint als der Lichtbogen bei 30 A Stromstärke. Darüber hinaus kann keine eindeutige Aussage über die Einschnürung des Lichtbogens durch den Laserstrahl gemacht werden. Es kann festgestellt werden, dass der Lichtbogen bei 50 A ohne zusätzliche Laserleistung eine Breite von ca. 32 Pixeln aufweist. Dieser Wert wird bei Erhöhung der Laserleistung nur sehr gering beeinflusst. Der Durchmesser des Lichtbogens bei 30 A Stromstärke liegt ohne Laserleistung bei ca. 17 Pixeln, wobei es zu einer großen Streuung der Werte kommt. Mit Erhöhung der Laserleistung streut der Durchmesser des Lichtbogens im Bereich von 17 bis 27 Pixeln.

Die Videoauswertung der Versuche ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Die Bilder zeigen den Zustand des Lichtbogens mit und ohne Laser. Deutlich ist hier die Wirkung des Laserstrahls auf den Lichtbogen erkennbar. Der Plasmalichtbogen wird konzentrisch

unterhalb der Elektrode auf das Werkstück fokussiert, der Prozessverlauf wird ruhiger und es kommt zum reproduzierbaren und gleichmäßigen Verlauf.

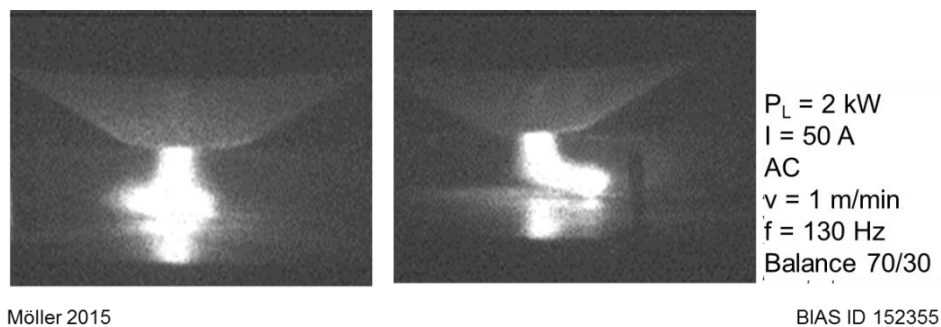


Abbildung 4-15: Lichtbogen mit (links) und ohne (rechts) Laser

Bei der Betrachtung der Einschnürung wurde keine Beeinflussung festgestellt. Somit wird festgehalten, dass der Mechanismus zur Stabilisierung bzw. Beeinflussung des Lichtbogens durch den Laserstrahl nicht im Bereich der Lichtbogenzone sondern auf der Werkstoffoberfläche liegt.

4.7 Versuchsdurchführung

4.7.1 Beeinflussung der Lichtbogenspannung

Bei koaxialer sowie beidseitiger Bearbeitungskonfiguration wird als wesentlicher Parameter die Laserleistung zwischen 50 W und 3000 W variiert. Der jeweilige Variationsbereich für die einzelnen Legierungen liegt zwischen einem nicht mehr nachweisbaren Einfluss und dem Durchschweißen bzw. der Einbringung von Metaldampf in die Plasmasäule. In Abbildung 4-16 sind typische Querschliffe gezeigt, die an der unteren bzw. oberen Grenze des Variationsbereiches liegen.

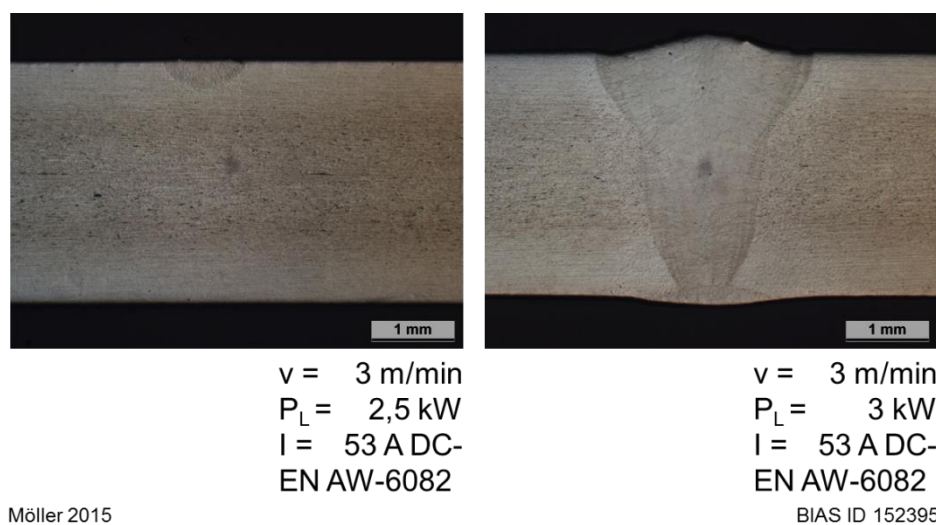


Abbildung 4-16: Querschliffe der unteren (links) und oberen (rechts) Grenze des Variationsbereiches

Die während der Bearbeitung konstant gehaltenen Parameter können aus Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Konstante Prozessparameter

Parameter	Wert
Plasmastrom	50 A
Vorschubgeschwindigkeit	3 m/min
Innengas Ar	0,5 l/min
Außengas Ar	15 l/min
Schutzgas Ar	20 l/min
Abstand Brenner zu Probe nach Zündung	6 mm

Zunächst werden die Proben arretiert. Vor dem Spannen erfolgt eine manuelle Reinigung mit Ethanol. Anschließend wird der Bearbeitungsvorgang über die Steuerung der Portalanlage gestartet, bei dem die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit den synchronisierten Aufnahmen des Transientenrekorders zur Lichtbogenspannung erstellt werden. Die Kamera ist dabei auf eine Aufnahme rate von 4000 Bildern pro Sekunde eingestellt, während der Transientenrekorder mit einer Abtastrate von 10 kHz aufzeichnet. Das Startsignal für die Portalanlage, welches ebenfalls aufgenommen wird, aktiviert die Stromquelle, den Transientenrekorder sowie die Hochgeschwindigkeitskamera. Nach der Zündung des Lichtbogens wird der Arbeitskopf mit konstanter Geschwindigkeit und Abstand zum Werkstück bewegt. Der Laser wird dann zugeschaltet. Der Transientenrekorder zeichnet die Zeit des aktivierten Lasers als Signal mit auf. Durch die Einstellung des Kameratriggers in Verbindung mit dem Ringspeicher der Kamera wird der zeitliche Bereich des Hybridverfahrens sowie des reinen Plasmaverfahrens aufgenommen.

Über die Aufzeichnung der jeweiligen Startsignale sowie Strom- und Spannungsverläufe auf einer zeitlichen Achse, ist die Synchronisation für die Untersuchung der Einzelprozesse zueinander gewährleistet und eventuelle Effekte können während eines kontinuierlichen Prozesses beobachtet werden. Die Signalfolge ist in Abbildung 4-17 dargestellt.

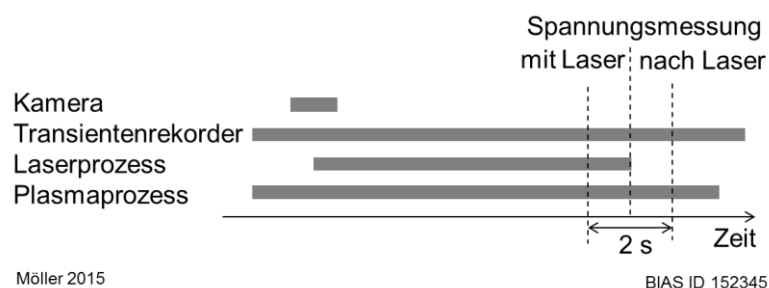


Abbildung 4-17: zeitliche Abfolge der Versuchsdurchführung

Die Bewertung der Einflussfaktoren erfolgt dabei durch die Betrachtung der Spannung zweier Bereiche. Zum einen werden die Spannungen aus dem Hybridbereich identifiziert (U_{mit}). Diesen werden die Spannungswerte aus dem Bereich des reinen Plasmaverfahrens

gegenüber gestellt (U_{nach}). Die absoluten Spannungswerte werden dabei über drei Messungen gemittelt. Durch diese Betrachtungsweise werden Störgrößen durch Positionierung oder Material ausgeschlossen und nur der Effekt der extrinsischen Größe, wie der Laserleistung, betrachtet. Der Spannungsabfall dU zwischen den beiden Bereichen wird wie folgt berechnet und im Folgenden prozentual angegeben:

$$dU = \frac{U_{nach} - U_{mit}}{U_{nach}} \quad 4-1$$

Die Anzahl der Messpunkte ist bei beiden Sequenzen mit und nach Laserprozess gleich groß und betrachten jeweils den Bereich 1 Sekunde vor und nach Abschalten des Laserstrahls. In den Diagrammen der absoluten Spannungen sind Werte aus jeweils drei Sequenzen aufgetragen und die dadurch entstehenden maximalen Abweichungen eines Mittelwertes angegeben.

4.7.2 Blindlötungen auf Aluminium

Zunächst werden die Proben ebenfalls eingespannt. Vor dem Spannen erfolgt eine manuelle Reinigung mit Ethanol. Anschließend wird der Bearbeitungsvorgang über die Steuerung der Portalanlage gestartet. Zur Sicherstellung, dass der Lichtbogen stabil zündet, ist nach dem Zündvorgang eine Wartezeit von 0,5 s eingestellt. Im Anschluss wird der Laserstrahl zugeschaltet. Mittels des Portalsystems werden der Drahtvorschub und die Vorschubbewegung gestartet. Nach dem eingestellten Verfahrensweg von 120 mm werden alle Prozesse abgeschaltet und der Bearbeitungskopf wieder in die Ausgangsposition befördert.

4.8 Mechanische Beeinflussung

Zur Beeinflussung des Lichtbogens wird zusätzlich zur thermischen Beeinflussung eine mechanische Beeinflussung untersucht. In Abbildung 4-18 ist dieses schematisch dargestellt. Die Spannung des Lichtbogens wird während des gesamten Ablaufs mittels des Transientenrekorders aufgezeichnet.

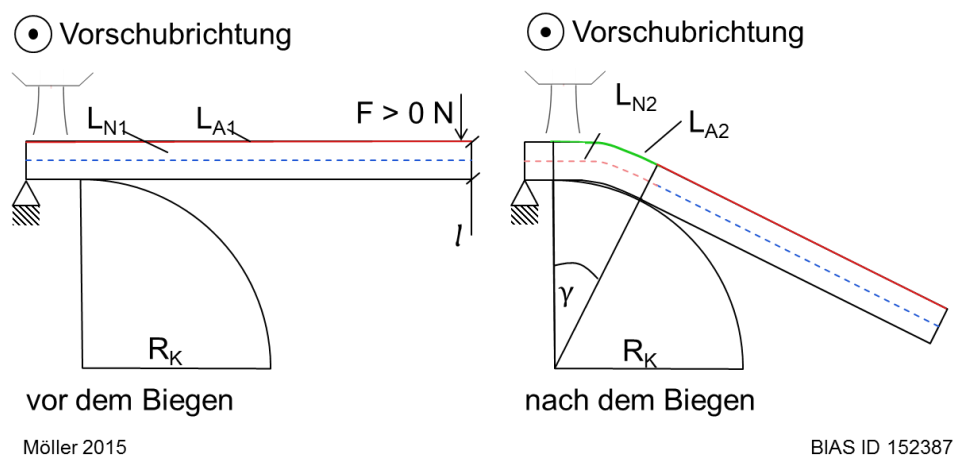


Abbildung 4-18: Mechanische Oberflächenbeeinflussung

Der Lichtbogen wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/min auf einer Aluminiumlegierung EN AW-6082 verfahren. Die Proben haben eine Geometrie von 150 mm x 300 mm x 3 mm. Nach einer Strecke von 50 mm wird die Probe durch eine manuelle Krafteinwirkung über einen Radius von 75 mm nach unten gebogen. Die Kraft wird über eine Strecke von 55 mm konstant gehalten. Im Anschluss werden weitere 50 mm der Lichtbogen ohne kraftbeeinflusstes Blech verfahren. Der Lichtbogenmittelpunkt ist dabei weiterhin auf der Blechoberseite positioniert.

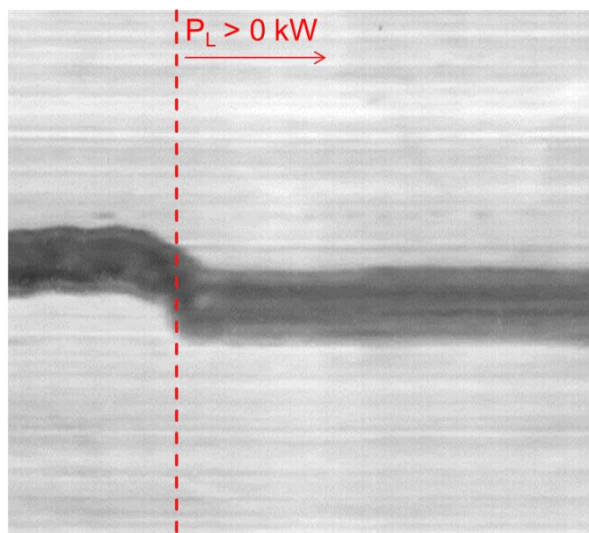
5 Ergebnisse

5.1 Spannungsmessung

5.1.1 Beidseitige Materialbearbeitung

5.1.1.1 Elektrisch negativ gepolte Elektrode

Zur Bestimmung des Einflusses der durch den Laserstrahl eingebrachten Spannungsänderung kommt der in Kapitel 4 beschriebene Aufbau der beidseitigen Bearbeitung zum Einsatz. Generell kann bei dieser Konfiguration eine schmale Wirkzone im Vergleich zur DC+ Konfiguration beobachtet werden. Die Oberfläche weist an den Stellen, an denen das Plasma gewirkt hat, eine gräuliche Oberfläche auf. In Abbildung 5-1 wird die plasmabeeinflusste Oberfläche gezeigt.



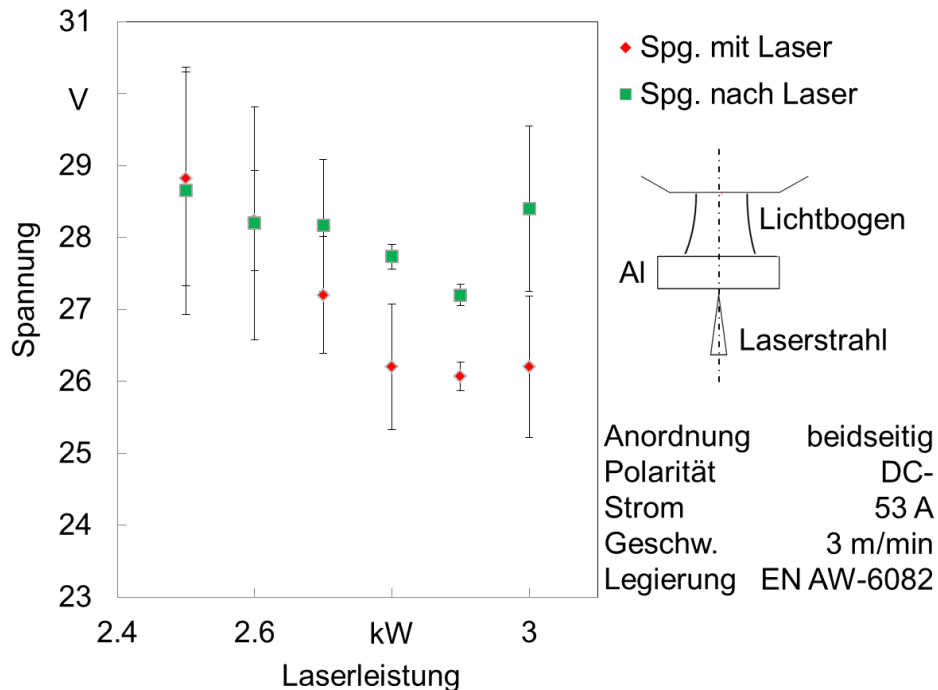
Anordnung	beidseitig
Polarität	DC-
Strom	53 A
Geschw.	3 m/min
Legierung	EN AW-6082

Möller 2015

BIAS ID 152400

Abbildung 5-1: Laserinduzierter Einfluss auf einen negativ gepolten Lichtbogen

Den Diagrammen sind zum einen die absoluten Werte der Spannungsmessung zu entnehmen, zum anderen sind die Werte prozentual (Gl. 4-1) aufgetragen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

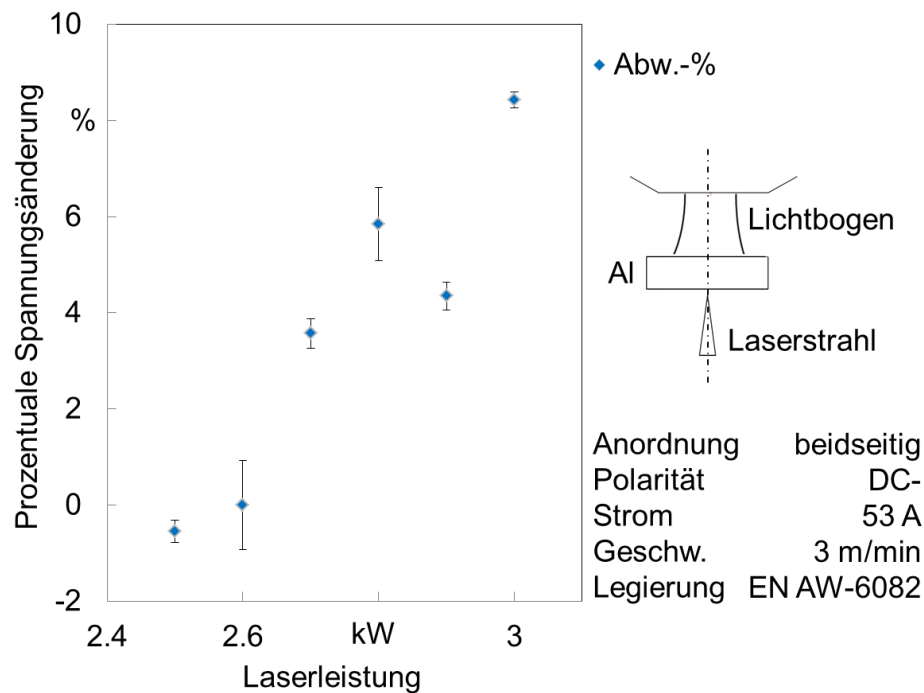


Möller 2015

BIAS ID 152357

Abbildung 5-2: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Abbildung 5-2 stellt die gemessene Lichtbogenspannung während des Prozesses mit und ohne Laser dar. Es wird der Bereich, während der Laser auf die gegenüberliegende Blechseite auftrifft, dargestellt. Dem wird der Wert der Spannung nach dem Abschalten des Lasers gegenübergestellt. Im Segment der wirkenden Laserstrahlung wird deutlich, dass es zu einer Abnahme der Spannung bei Erhöhung der Laserleistung kommt. Der Bereich nach dem Laser zeigt, basierend auf einem großen Streubereich, eine leicht abnehmende Tendenz. Diese wird durch die materialbedingte Wärmekapazität bedingt. Der große Streubereich kann auf die Funktionsweise des Lichtbogenprozesses zurückverfolgt werden, da sich, durch marginale Änderungen auf der Oberfläche oder beim Abstand zwischen Elektrode und Werkstück, Änderungen in der Spannung ergeben. Diese sind für die Untersuchung nicht relevant, da die Messungen jeweils relativ zueinander betrachtet werden. Es werden vergleichend die Bereiche vor und nach dem Hinzufügen des Laserstrahles betrachtet. Dabei wird deutlich, dass der Abstand zwischen den Spannungen zunimmt. Dies zeigt sich bei der Betrachtung von Abbildung 5-3. Es werden die prozentualen Änderungen gemäß Gl. 4-1 der Spannung dargestellt.



Möller 2015

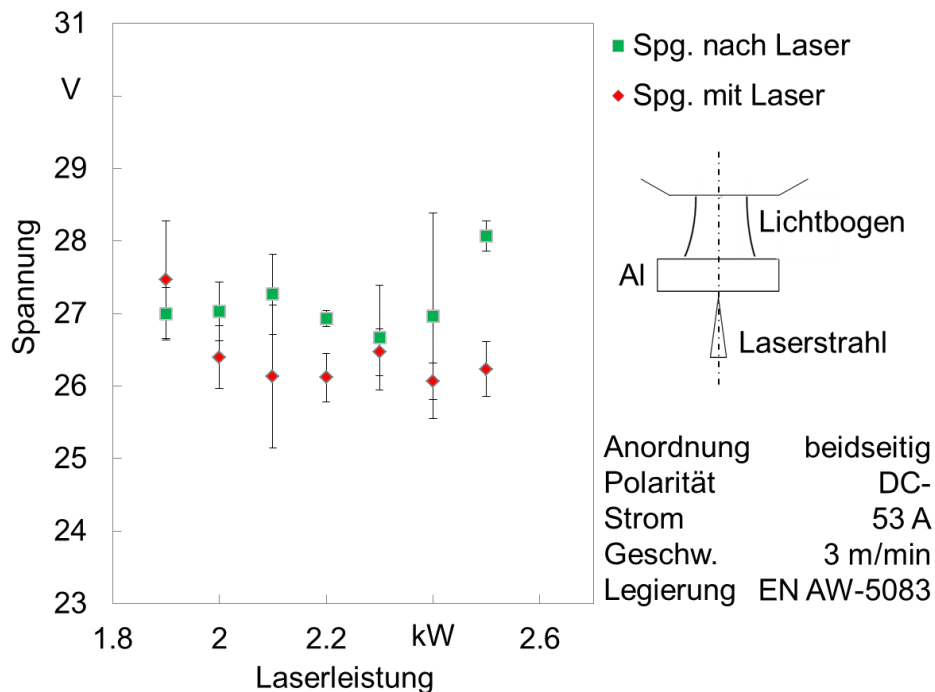
BIAS ID 152358

Abbildung 5-3: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Der Unterschied zwischen den Bereichen mit und ohne Laser wird bei steigender Laserleistung größer. Die Leistung wird dabei zwischen 2,5 kW und 3 kW variiert. Unterhalb einer Leistung von 2,5 kW kann keine Beeinflussung des Lichtbogens nachgewiesen werden. Oberhalb der Leistung von 3 kW kommt es zum Durchschweißen des Bleches und zum Eintrag von Metaldampf in das Lichtbogenplasma. Im Gegensatz dazu, dass die absoluten Spannungswerte zwischen den einzelnen Messungen schwanken können, ist bei der Betrachtung der Spannungsabweichungen eine deutlich geringere Streuung zu sehen. Hier zeigt sich, dass eine gute Reproduzierbarkeit der Werte gegeben ist.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen bei der Aluminiumlegierung EN AW-5083 durchgeführt. Der Einfluss der in Kapitel 4 beschriebenen Abweichung der Wärmeleitfähigkeit soll dabei analysiert werden. In Abbildung 5-4 wird die Lichtbogenspannung bei steigender Laserleistung demonstriert. Analog zu den Untersuchungen der Legierung EN AW-6082 wird auch hier der Effekt deutlich, dass generell die Spannung während der Einwirkung des Laserstrahls auf der gegenüberliegenden Oberfläche abnimmt. Es kommt zu einem initialen Absinken der Spannung. Ab einem Wert von 2 kW bleibt der Einfluss der Laserleistung auf die Spannung konstant. Die Laserleistung ist vom nicht mehr nachweisbaren Einfluss bis zum Durchschweißen des Bleches variiert worden. Der Leistungsbereich liegt bei der

Aluminiumlegierung zwischen 1,9 kW und 2,5 kW. Damit liegen die Laserleistungen zur Spannungsbeeinflussung unterhalb denen der Legierung EN AW-6082.



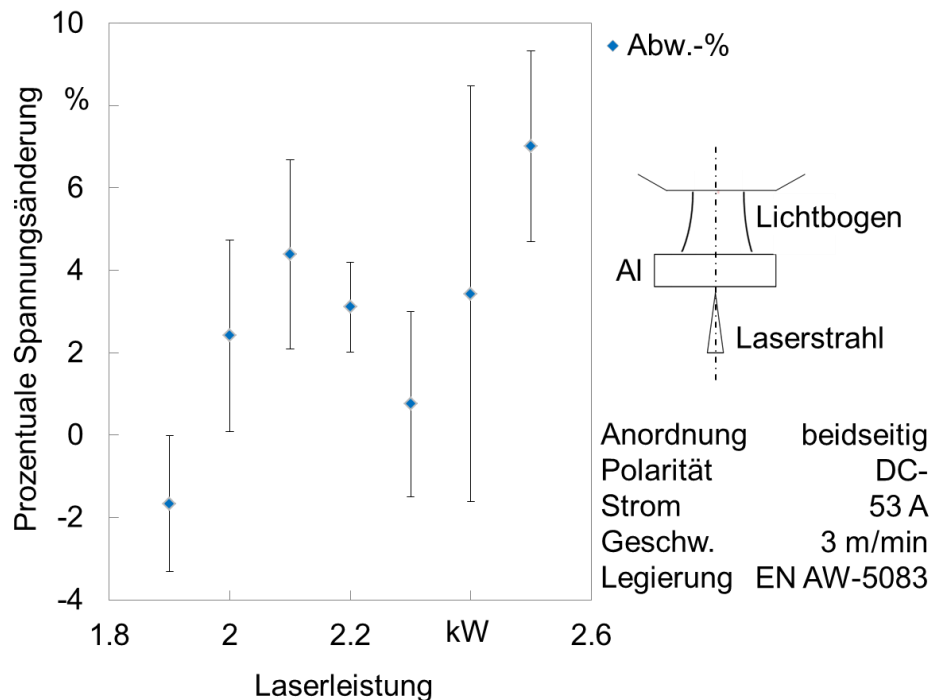
Möller 2015

BIAS ID 152359

Abbildung 5-4: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger

Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-5083

Bei der Betrachtung der prozentualen Abweichungen zeigt sich zum einen eine große Streuung der Werte, zum anderen ist eine steigende Tendenz der Spannungsänderung zu verzeichnen. Es können, wie bei der 6000er Legierung, maximale Einflusswerte von bis zu 9 % identifiziert werden. Bei den absoluten Werten bedeutet dies eine Spannungsabnahme von bis zu 2,2 V.



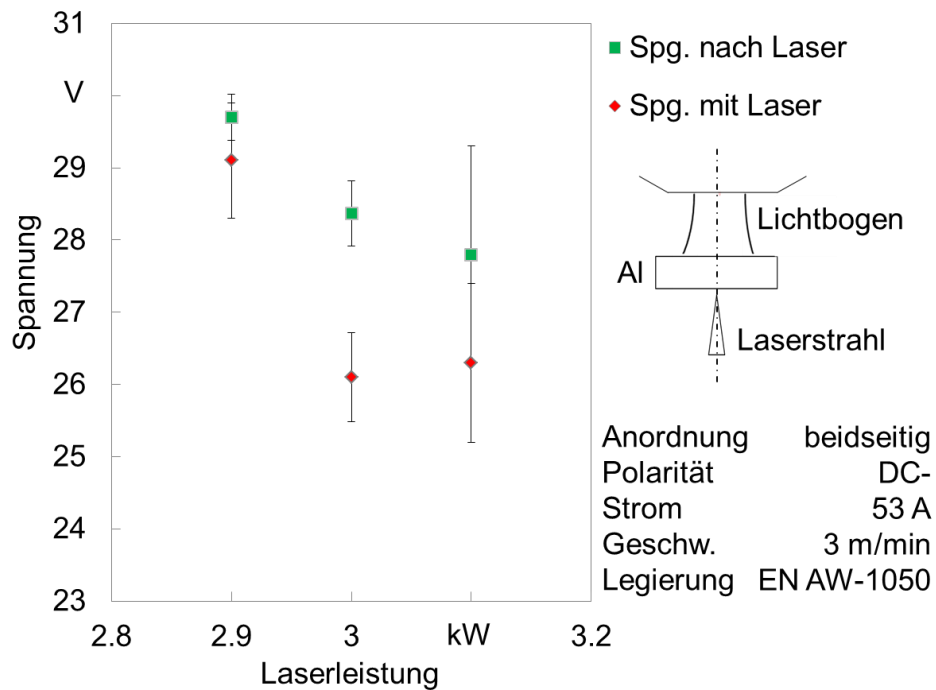
Möller 2015

BIAS ID 152360

Abbildung 5-5: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-5083

Eine dritte Variation der Wärmeleitung kann durch die Verwendung von Al 99,5 (EN AW-1050) untersucht werden (Abbildung 5-6). Die Wärmeleitung liegt von den drei untersuchten Legierungen am höchsten. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass ein sehr begrenztes Variationsfenster für die Untersuchungen verfügbar ist. Die Leistungen des Lasers wurden daher zwischen 2,9 kW und 3,1 kW variiert. Analog zu den anderen Legierungen liegen die Grenzen im Bereich vom nicht nachweisbaren Einfluss bis zum Durchschweißen. Die Spannungen mit Laser liegen ebenfalls unterhalb der Spannungen ohne den Einfluss des Lasers.

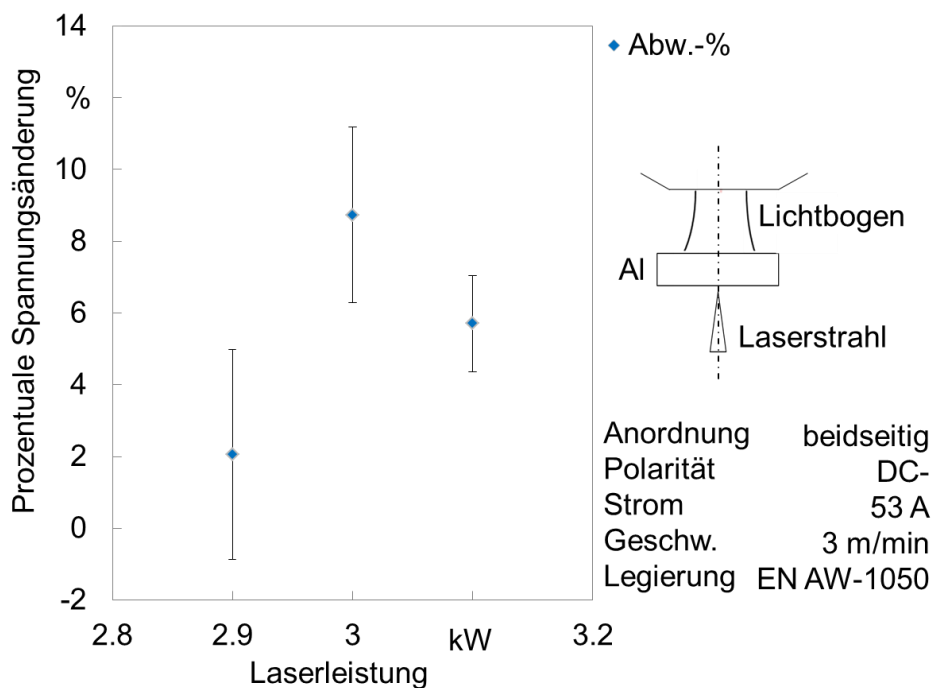
Die Betrachtung der prozentualen Spannungsänderung zeigt, dass bei einer Leistung von 2,9 kW der Einfluss auf die Spannung des Lichtbogens auf der gegenüberliegenden Seite teilweise nicht mehr nachweisbar ist. Ein weiteres Reduzieren der Spannung ist daher nicht zielführend. Bei einer weiteren Erhöhung der Leistung bis an die Grenzen des Durchschweißens nimmt die Spannungsänderung zunächst zu und sinkt dann wieder ab. Von allen Legierungen ist die Schwellleistung des Lasers zur Beeinflussung des Lichtbogens bei der Legierung EN AW-1050 am höchsten.



Möller 2015

BIAS ID 152361

Abbildung 5-6: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-1050



Möller 2015

BIAS ID 152362

Abbildung 5-7: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-1050

Insgesamt ist bei allen drei Legierungen die Abnahme der Spannung durch Hinzuschalten des Lasers zu beobachten. Die Schwellleistung des Laserstrahls, die zu einem messbaren Einfluss führt, ist bei den untersuchten Legierungen unterschiedlich.

5.1.1.2 Elektrisch positiv gepolte Elektrode

Im Stand der Technik ist bereits erwähnt worden, dass der Lichtbogen bei einer positiv gepolten Elektrode von sich aus schon stabiler brennt. Zur Untersuchung des Einflusses dieser These ist bei gewählter beidseitiger Anordnung die Polung auf DC+ verändert worden.

Generell kann bei dieser Konfiguration eine deutlich breitere Wirkzone als bei einer DC-Konfiguration beobachtet werden. Die Oberfläche weist an den Stellen, an denen das Plasma gewirkt hat, eine gräuliche bis weißliche Oberfläche auf. Dies liegt an der Oberflächenveränderung durch den Lichtbogen. In Abbildung 5-8 wird die plasmaseitige Oberfläche gezeigt. Es wird deutlich, dass der Laser eine signifikante Wirkung auf den Lichtbogen hat. Sobald der Laser zum Prozess hinzugeschaltet wird, ändert sich das Verhalten des Lichtbogens. Die Reinigungszone wird weißlich. Sobald der Laser wieder abgeschaltet wird, ändert sich die Oberfläche wieder ins gräuliche.

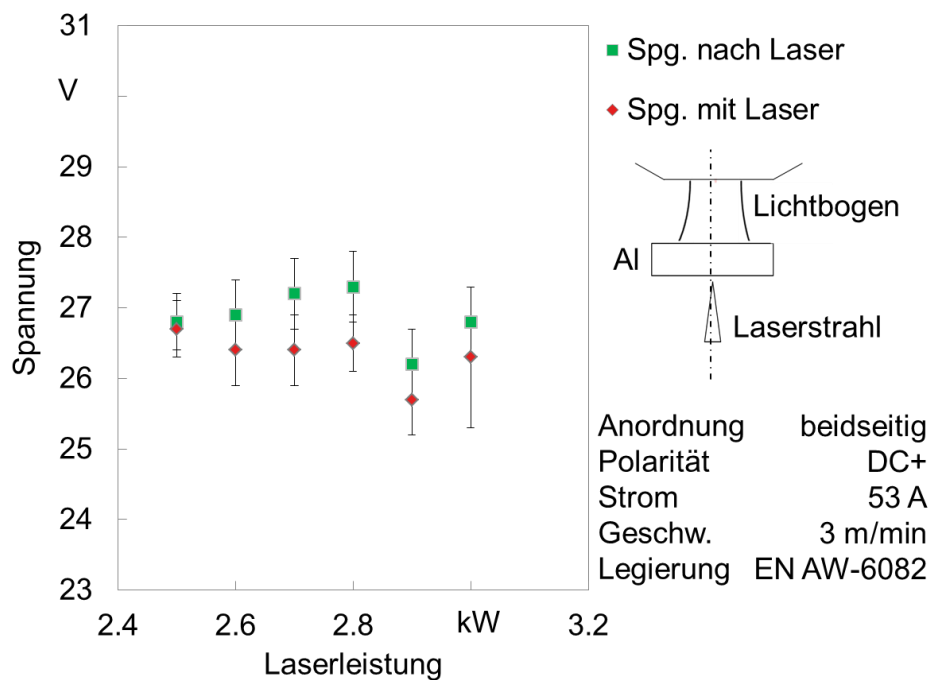


Möller 2015

BIAS ID 152386

Abbildung 5-8: Laserinduzierter Einfluss auf einen positiv gepolten Lichtbogen

Die Wirkung des Lasers kann optisch mittels dieses Phänomens bestimmt werden. Für die messtechnische Erfassung der Spannungswerte spielt die Veränderung der Oberfläche keine Rolle. In Abbildung 5-9 wird der Zusammenhang zwischen der Laserleistung und der Lichtbogenspannung bei positiv gepolter Elektrode und beidseitiger Konfiguration dargestellt.



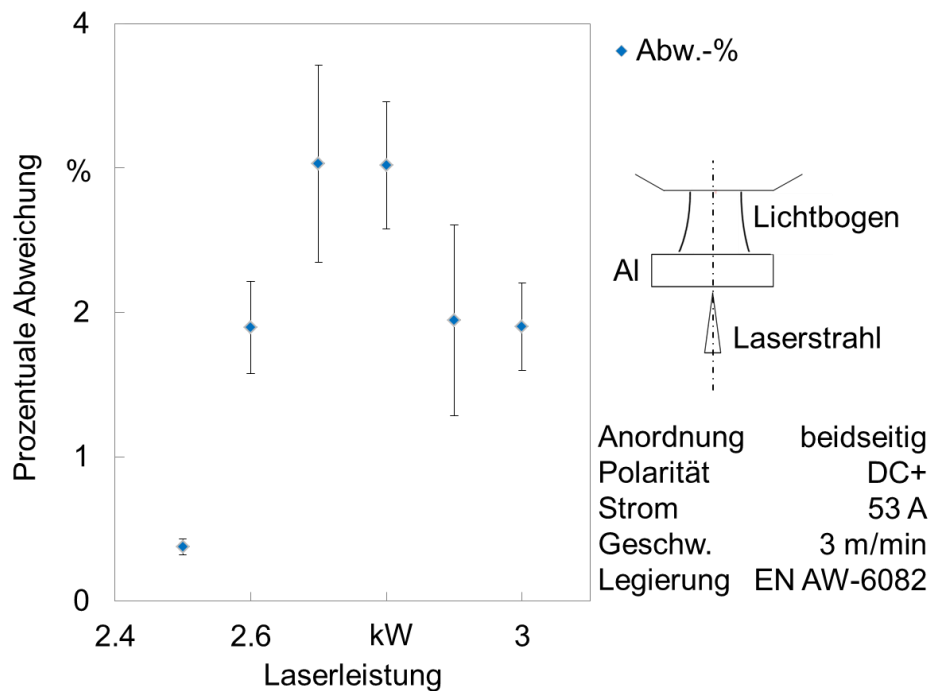
Möller 2015

BIAS ID 152363

Abbildung 5-9: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Es wird deutlich, dass es, wie auch bei einer negativ gepolten Elektrode, zu einer grundsätzlichen Beeinflussung des Lichtbogens kommt. Die Leistung ist hier zwischen 2,5 kW und 3 kW variiert worden, bevor ein Durchschweißen beobachtet werden konnte. Bei einer Leistung von 2,5 kW konnte der Effekt nicht mehr nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen der DCEN-Messung der 6000er Legierung zeigt sich, dass die Werte der Spannung mit dem Laser nicht kontinuierlich abnehmen. Der Einfluss des Lasers steigt von 2,5 kW auf 2,6 kW stark an. Die Spannung nimmt, mit Ausnahme eines Ausreißers, mit steigender Laserleistung nicht weiter ab.

Dieser Effekt spiegelt sich auch in der prozentualen Abnahme der Spannung wider (Abbildung 5-10). Es zeigt sich im Vergleich zur negativ gepolten Elektrode, dass die Abnahme nicht mit steigender Laserleistung zunimmt, sondern ab einer Laserleistung von 2,5 kW zwischen 2 % und 3 % wechselt. Damit fällt sie deutlich kleiner aus als die Vergleichsmessung mit einer negativ gepolten Elektrode. Der Bereich der Laserleistung ist jedoch gleich.



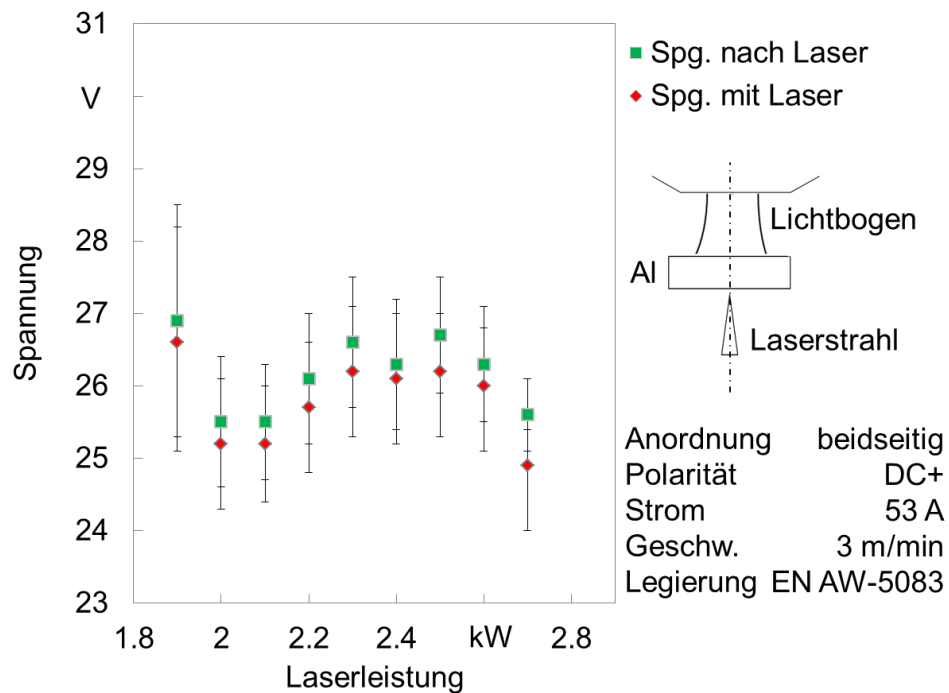
Möller 2015

BIAS ID 152364

Abbildung 5-10: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Um die Frage nach dem Einfluss der Legierung auch für den Fall der positiv gepolten Elektrode zu klären, sind Untersuchungen mit dem beidseitigen Aufbau und einer 5000er Legierung durchgeführt worden. In Abbildung 5-11 werden die Ergebnisse der Spannungsmessung dargestellt. Der Variationsbereich der Laserleistung ist dabei analog zu den Untersuchungen bei der DCEN-Konfiguration gewählt worden. Es zeigt sich, dass es zu deutlich stärkeren Schwankungen zwischen den einzelnen Messungen kommt. Sie zeigen tendenziell, dass die Spannungen mit Laser unterhalb der Spannungen ohne Laser liegen. Die Unterschiede liegen bei $0,2 \text{ V} \pm 0,09 \text{ V}$. Bei Betrachtung der Streubalken ist dieser Einfluss vernachlässigbar.

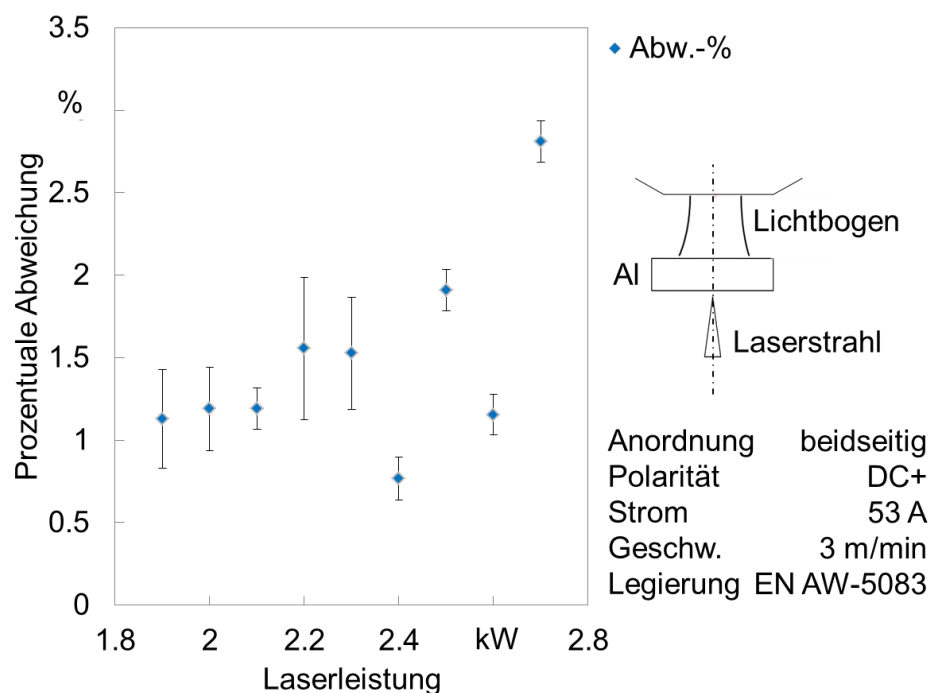
Die Betrachtung der prozentualen Abweichung zeigt, dass die Einflussnahme der Laserwirkzone auf den Lichtbogen gering ist. Es können maximale Abweichungen von 2,7 % beobachtet werden. Im Vergleich zur negativen Konfiguration, in der ein Wert bis 9 % gemessen werden konnte, ist hier die Abnahme niedrig. Es kann festgestellt werden, dass eine Beeinflussung des Lichtbogens über 1,5 % erst ab einer Leistung von 2,2 kW auftritt. Dies entspricht einer Differenz von 300 W zum Vergleichswert der Messung einer negativ gepolten Elektrode.



Möller 2015

BIAS ID 152365

Abbildung 5-11: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-5083



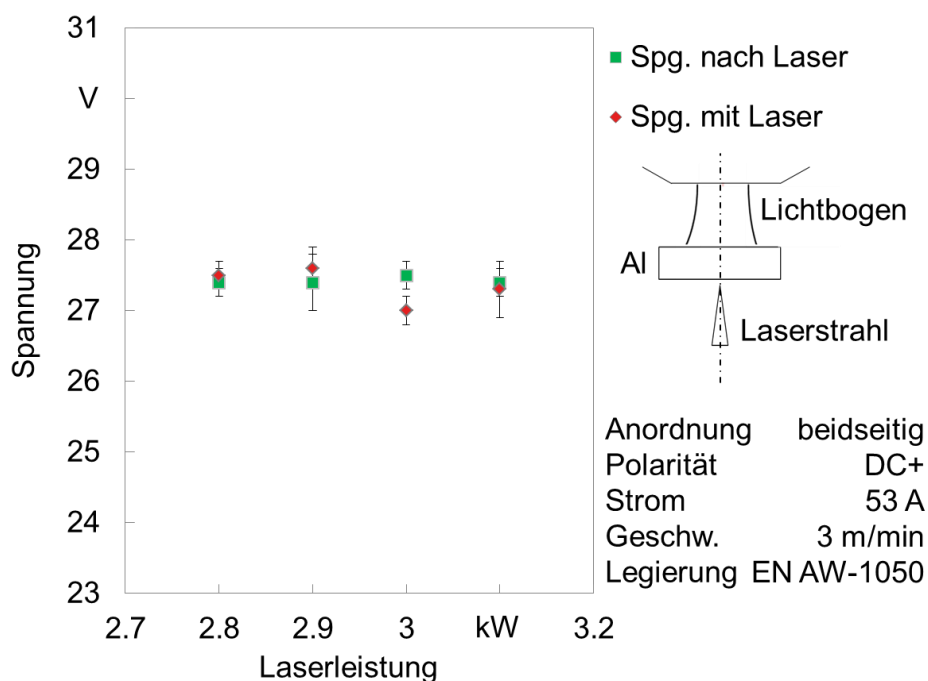
Möller 2015

BIAS ID 152366

Abbildung 5-12: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-5083

Die Ergebnisse der Lichtbogenspannungsmessung bei Al 99,5 werden in Abbildung 5-13 präsentiert. Die Variation der Polarität auf DCEP zeigt, wie auch die 5000er und 6000er

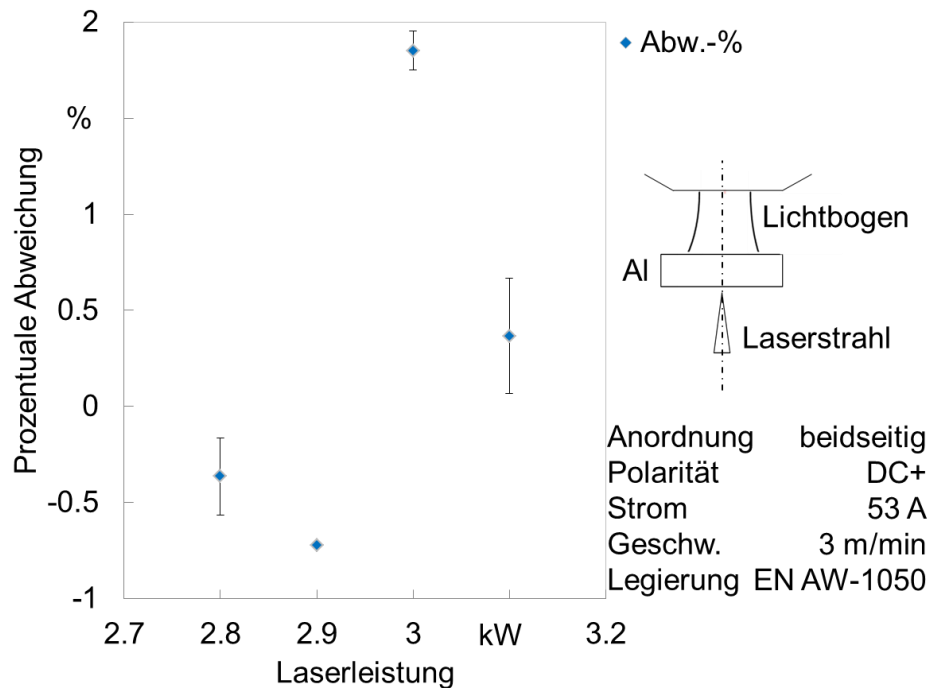
Aluminiumlegierung, eine geringfügigere Beeinflussung des Lichtbogens durch die zusätzliche Temperatur des Laserstrahls als bei einer negativ gepolten Elektrode. Zudem können erste Einflüsse auf die Lichtbogenspannung ab einer Laserleistung von 3 kW beobachtet werden. Dieser Effekt wird bei der Betrachtung der prozentualen Abweichungen deutlicher (Abbildung 5-14). Unterhalb einer Laserleistung von 3 kW kann keine Abnahme der Lichtbogenspannung identifiziert werden. Auch bei Steigerung der Laserleistung liegt die maximale Beeinflussung unterhalb 2 %. Darüber hinaus fällt beim Vergleich der Polungen auf, dass sich der Verlauf der Kurven sehr ähnelt, sodass bei beiden Untersuchungen ein Maximum bei 3 kW auftritt.



Möller 2015

BIAS ID 152367

Abbildung 5-13: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-1050



Möller 2015

BIAS ID 152368

Abbildung 5-14: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei beidseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-1050

Für alle drei untersuchten Legierungen kann festgestellt werden, dass die Spannung bei einer Konfiguration von DCEP deutlich geringer beeinflusst wird als bei einer DCEN-Konfiguration. Am Beispiel der 5000er Legierung wird der Einfluss insgesamt vernachlässigbar klein. Es kann beobachtet werden, dass der Effekt optisch sichtbar ist, aber die Spannung des Lichtbogens nicht beeinflusst. Die Wirkzone des Lichtbogens ist im Vergleich zur DCEN-Konfiguration insgesamt deutlich größer.

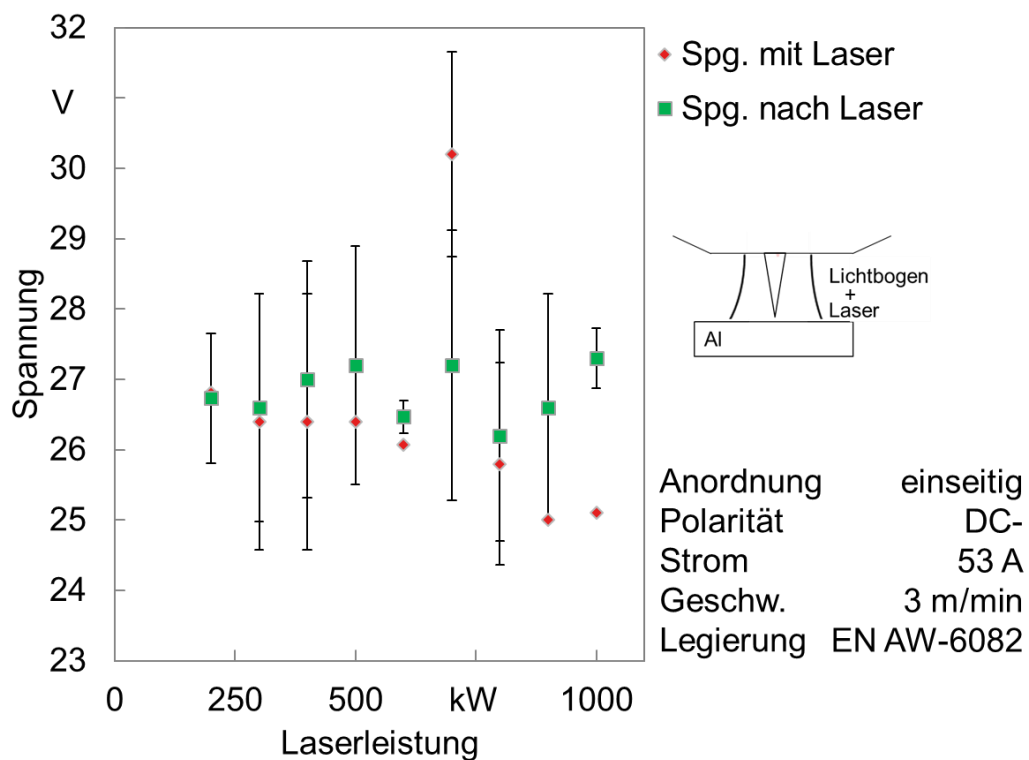
5.1.2 Einseitig koaxiale Anordnung

5.1.2.1 Elektrisch negativ gepolte Elektrode

Zur Untersuchung der in Kapitel 3 genannten Hypothese wurden Untersuchungen mit einem gleichseitigen Prozess durchgeführt. Der dazugehörige Aufbau wurde bereits in Kapitel 4.5 beschrieben.

In Abbildung 5-15 wird der Zusammenhang der Spannung und einer steigenden Laserleistung dargestellt. Die Grenzen des Variationsbereichs wurden so eingestellt, dass zum einen kein nachweisbarer Einfluss mehr vorhanden ist, zum anderen es zur Ausbildung einer Dampfkapillare kommt. Durch die Ausbildung eines Keyholes kommt es zur verstärkten Bildung von Metaldampf, was die Messung signifikant beeinflussen würde. Für den Fall der Legierung EN AW-6082 liegt daher der Variationsbereich zwischen 200 W bis 1000 W. Die Werte zeigen einen ähnlichen Verlauf im Vergleich zu den Messungen der beidseitigen Wirkzonen. Die Spannungen nach Abschalten des Lasers

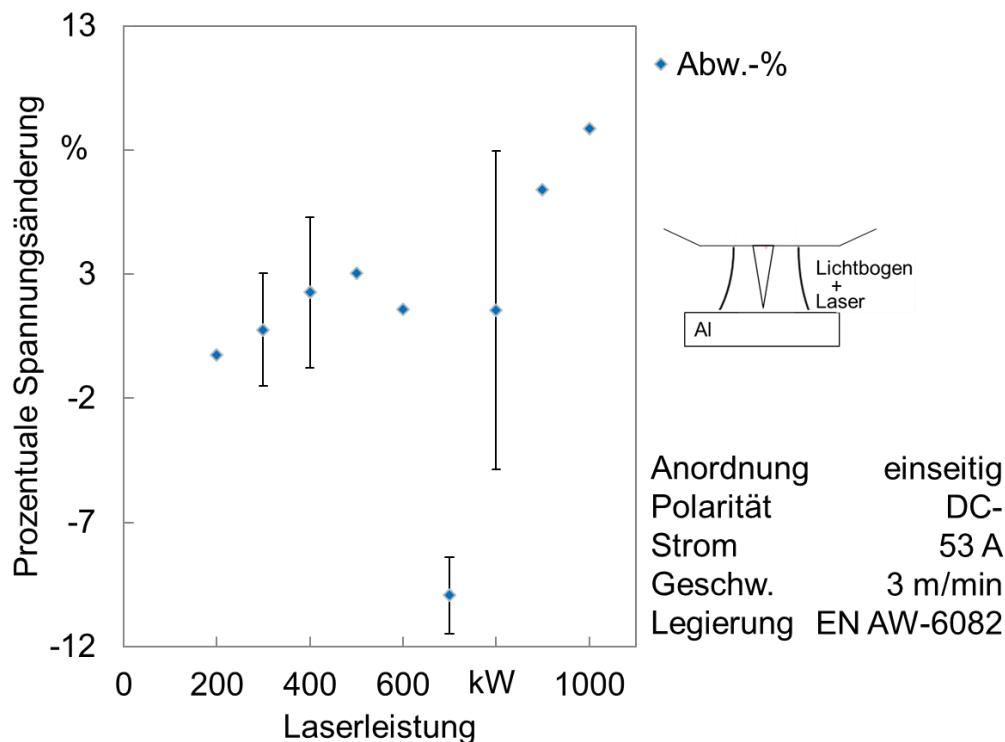
liegen trotz variiert Leistung in einem konstanten Bereich. Im Gegensatz dazu nimmt die Spannung im Bereich mit Laserstrahl bei zunehmender Laserleistung und damit steigender Energieeinbringung ab. Bei der Betrachtung der prozentualen Abnahme der Spannung zwischen Hybridbereich und reinem Plasmalichtbogen zeigt sich die Tendenz der steigenden Beeinflussung des Lichtbogens bei steigender Laserleistung. Ein positiver Wert zeigt hierbei einen steigenden Einfluss bzw. eine höhere Abnahme der Spannung durch den Einsatz des Lasers. Analog zu den beidseitigen Wirkzonen können Spannungsabnahmen von bis zu 9 % erreicht werden.



Möller 2015

BIAS ID 152369

Abbildung 5-15: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-6082



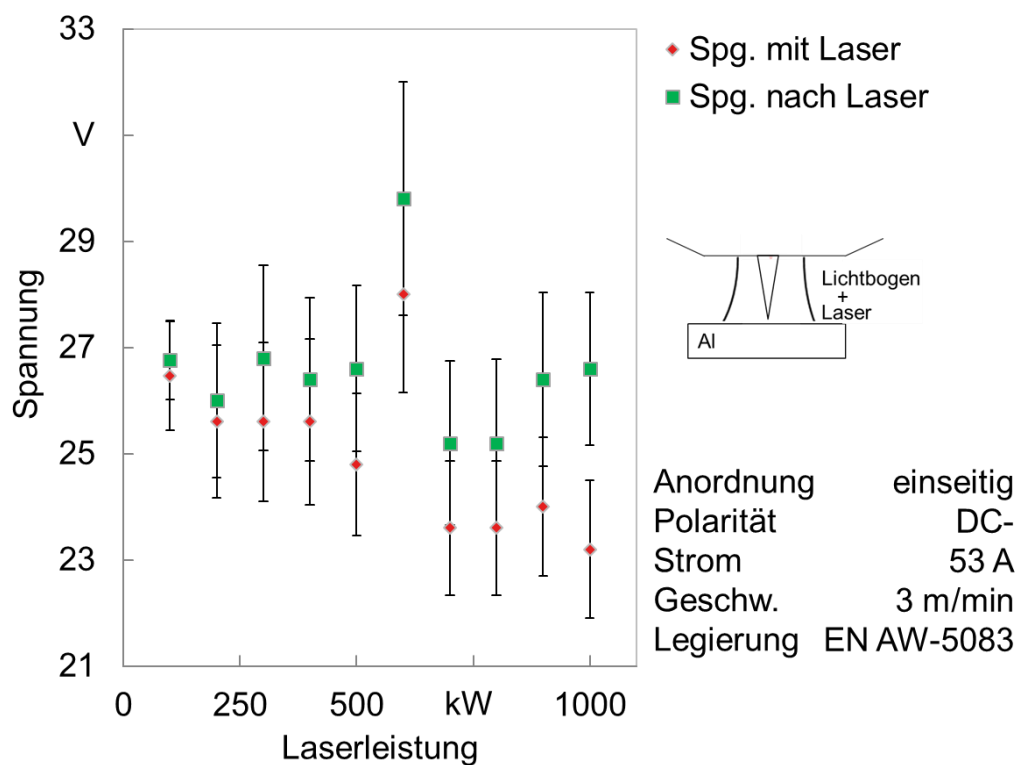
Möller 2015

BIAS ID 152370

Abbildung 5-16: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Bei den Ergebnissen der Legierung EN AW-5083 und der coaxialen Anordnung zeigt sich, dass, im Vergleich zur Legierung EN AW-6082, weniger Leistung benötigt wird, um einen Einfluss auf den Lichtbogen zu identifizieren. In Abbildung 5-17 wird dargestellt, dass erst ab einer minimalen Leistung von 100 W kein nachweisbarer Einfluss der Wirkung des Laserstrahls zu beobachten ist. Die Spannung nach dem Abschalten des Lasers bleibt nahezu konstant. Es kann beobachtet werden, dass im Bereich des Hybridprozesses die Spannung bei steigender Laserleistung abnimmt.

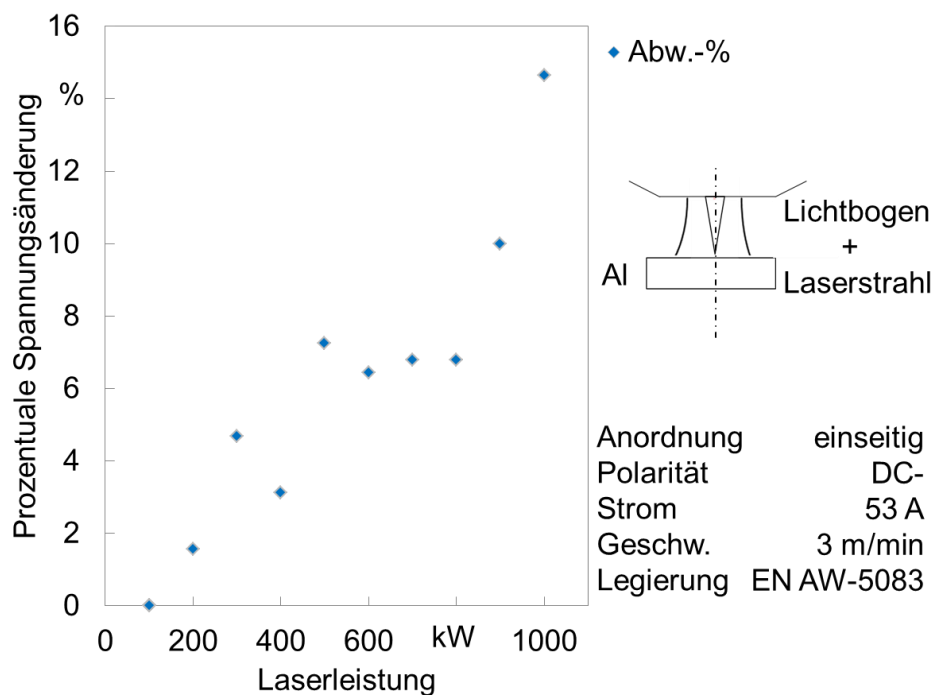
In Abbildung 5-18 wird der Effekt durch Betrachtung der prozentualen Änderung deutlich. Ab 200 W Laserleistung kommt es bereits zu Spannungsänderungen von 2 %, welche bei der Legierung EN AW-6082 erst ab 350 W zu verzeichnen sind. Bei einem Vergleich der Ergebnisse mit denen der beidseitigen Anordnung der Prozesse wird ein deutlich höherer Maximalwert erreicht. Die Streubalken liegen in diesem Fall bei $0,22 \% \pm 0,11 \%$ und sind daher vernachlässigbar klein.



Möller 2015

BIAS ID 152371

Abbildung 5-17: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-5083



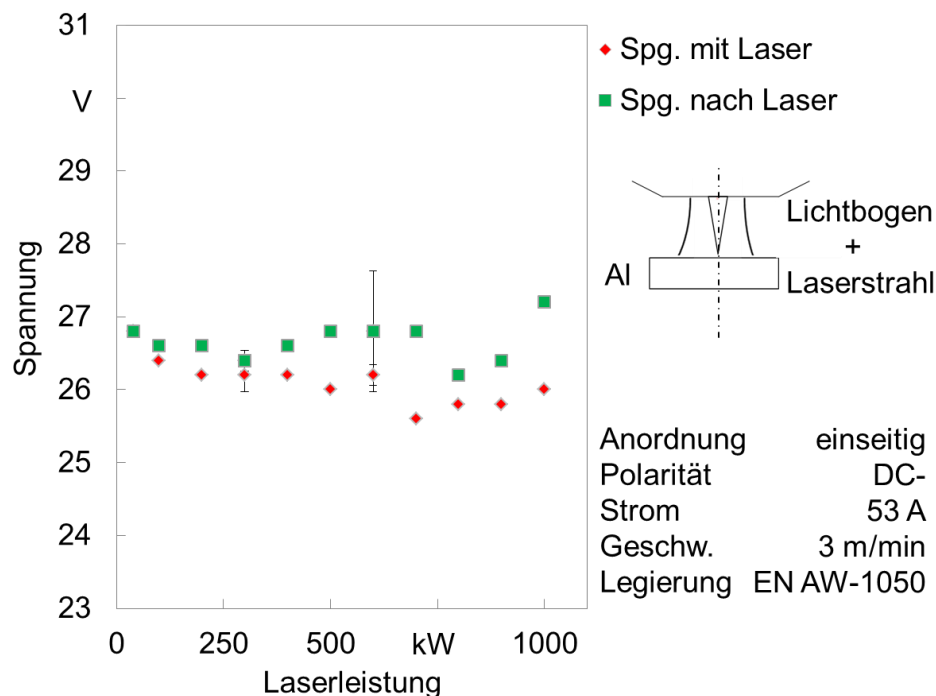
Möller 2015

BIAS ID 152372

Abbildung 5-18: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-5083

Die Ergebnisse der einseitigen Versuchsanordnung bei einer Reinaluminiumlegierung werden in Abbildung 5-19 präsentiert. Die Leistung des Laserstrahls wurde bis an die untere Grenze der Laserstrahlquelle variiert. Erst unterhalb von 1 % des vom Lasermodul angegebenen Maximalwerts kann keine Beeinflussung mehr festgestellt werden. In diesem Bereich liegt die Streuung der Laserleistung durch das Lasermodul bei ca. 50 W. Mit steigender Laserleistung kann eine leicht abnehmende Tendenz der Lichtbogenspannung beobachtet werden.

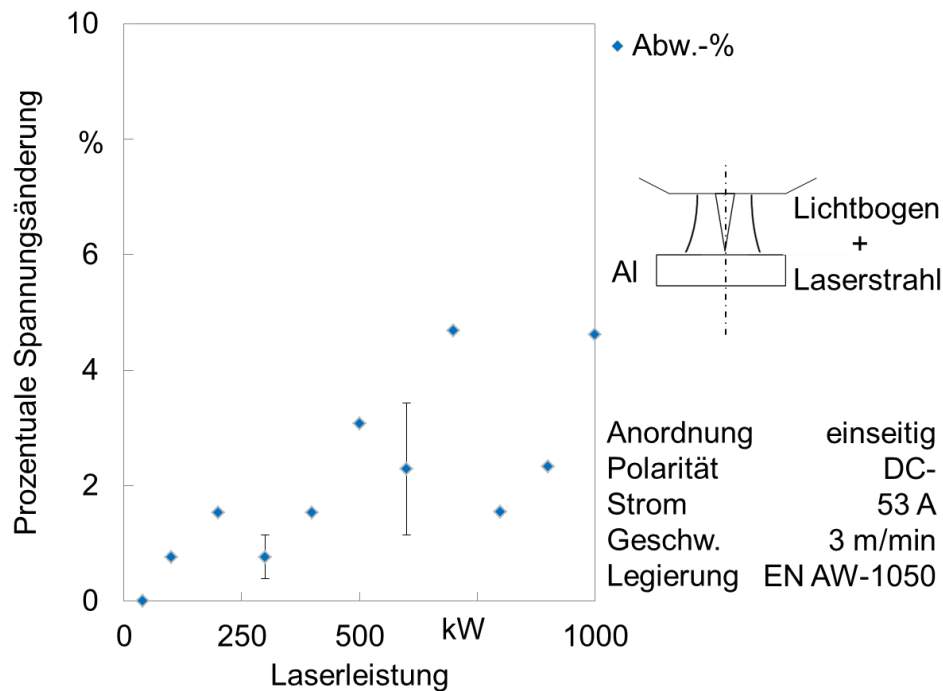
Darüber hinaus zeigt sich bei der Betrachtung der prozentualen Abweichung eine steigende Tendenz der Beeinflussung mittels der Laserleistung. Der Laservariationsbereich ist im Vergleich zur beidseitigen Konfiguration deutlich größer. Die maximale Spannungsänderung liegt bei 5 %



Möller 2015

BIAS ID 152373

Abbildung 5-19: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-1050



Möller 2015

BIAS ID 152374

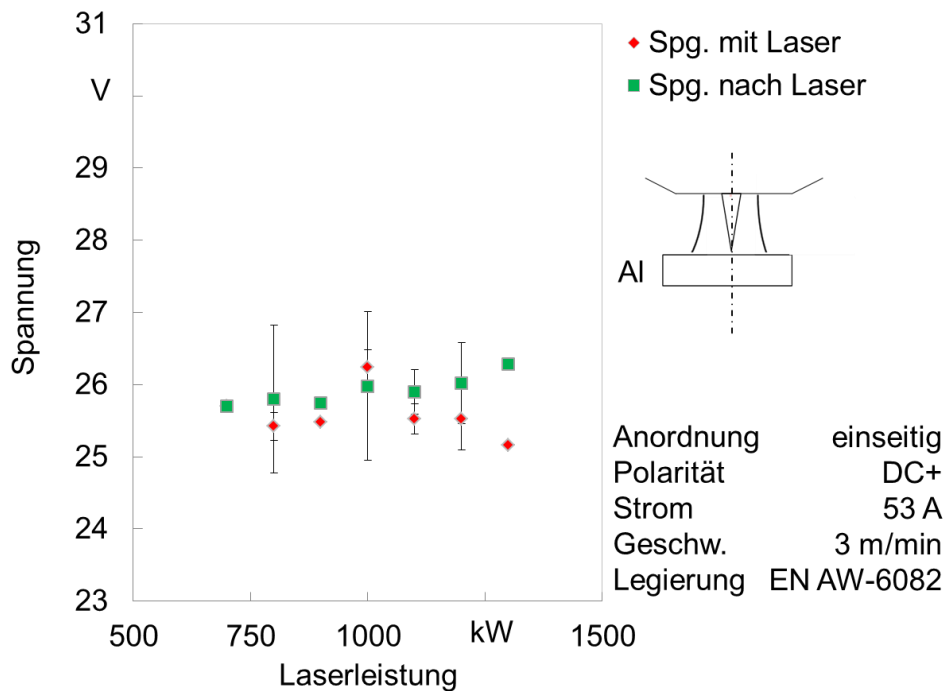
Abbildung 5-20: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und negativ gepolter Elektrode auf EN AW-1050

Bei den drei Legierungen kann festgestellt werden, dass im Vergleich zur beidseitigen Konfiguration deutlich weniger Laserleistung benötigt wird, um einen Effekt auf den Lichtbogen nachzuweisen. Es kann generell ein Einfluss durch Hinzuschalten des Laserstrahls beobachtet werden. Die Höhe der Spannungsänderungen ist vergleichbar, allerdings nicht bei gleichen Laserleistungen.

5.1.2.2 Elektrisch positiv gepolte Elektrode

Die Besonderheit dieser Konfiguration ist die Tatsache, dass zu dem von sich aus schon stabiler brennenden Lichtbogen die Oberfläche, auf der die Laserstrahlung einwirkt, durch den Lichtbogen vorbehandelt ist. Durch die kathodische Reinigungswirkung wird die Oberflächenrauheit erhöht und die Absorption des Lasers kann sich verändern. Bei einer relativen Messung, wie sie hier zum Einsatz kommt, kann trotz der Änderung auf der Oberfläche ein Vergleich zwischen den Legierungen gemacht werden.

Der Einfluss auf den Lichtbogen bei der Aluminiumlegierung EN AW-6082 wird in Abbildung 5-21 dargestellt. Der Leistungsbereich wurde von 700 W bis 1300 W variiert.

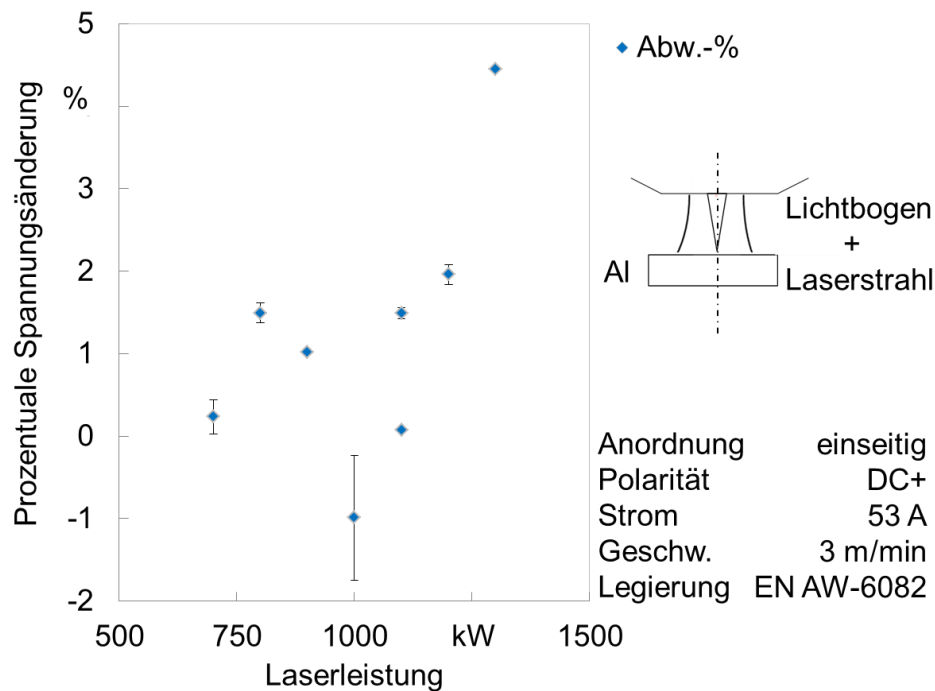


Möller 2015

BIAS ID 152375

Abbildung 5-21: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-6082

Unterhalb von 700 W kann kein Einfluss der Laserleistung nachgewiesen werden. Ab 1300 W bildet sich eine Dampfkapillare aus und die Werte sind nicht mehr aussagefähig. Trotz der hohen Messfrequenz liegen die Werte alle in einem Bandbereich von 1,5 V. Das wird deutlicher bei der Betrachtung der prozentualen Abweichungen. Eine prozentuale Abweichung von 2 % entspricht einem absoluten Wert von 0,26 V. Im Vergleich zur beidseitigen Konfiguration zeigt sich, dass der Einfluss der Laserstrahlung primär unterhalb von 2 % bleibt. Teilweise kann sogar eine niedrigere Spannung ohne Laser gemessen werden.

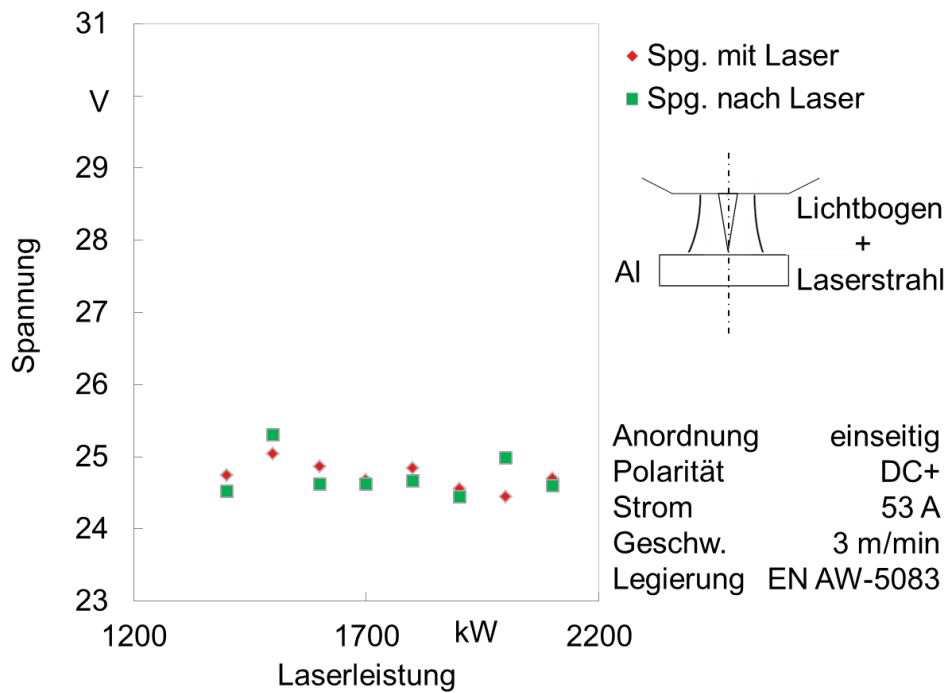


Möller 2015

BIAS ID 152376

Abbildung 5-22: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-6082

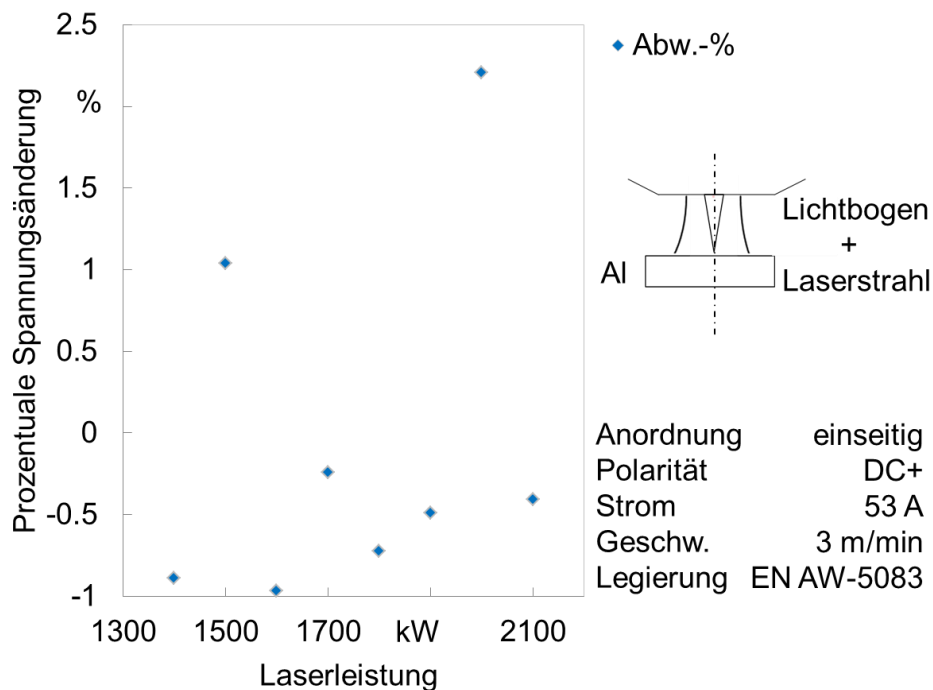
Für den Fall der EN AW-5083 zeigt sich, dass die Spannungen im Bereich des kombinierten Verfahrens überwiegend höher sind als die Spannungen ohne Laser. Dieser Effekt verdeutlicht, dass der Einfluss über den gesamten Variationsbereich des Lasers nicht nachweisbar ist. Stichprobenartige Versuche, die Laserleistung bis in den Bereich der Keyholebildung zu steigern, weisen Einflüsse der Laserleistung auf, können aber aufgrund der Metaldampfbildung nicht mit einbezogen werden. Deutlich wird dieses Ergebnis bei Betrachtung der prozentualen Ergebnisse (Abbildung 5-24). Die Spannungswerte weisen verstärkt eine Spannungserhöhung durch den Einsatz des Laserstrahls auf. Eine Stabilisierung des Lichtbogens kann über die Spannung nicht nachgewiesen werden.



Möller 2015

BIAS ID 152377

Abbildung 5-23: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-5083



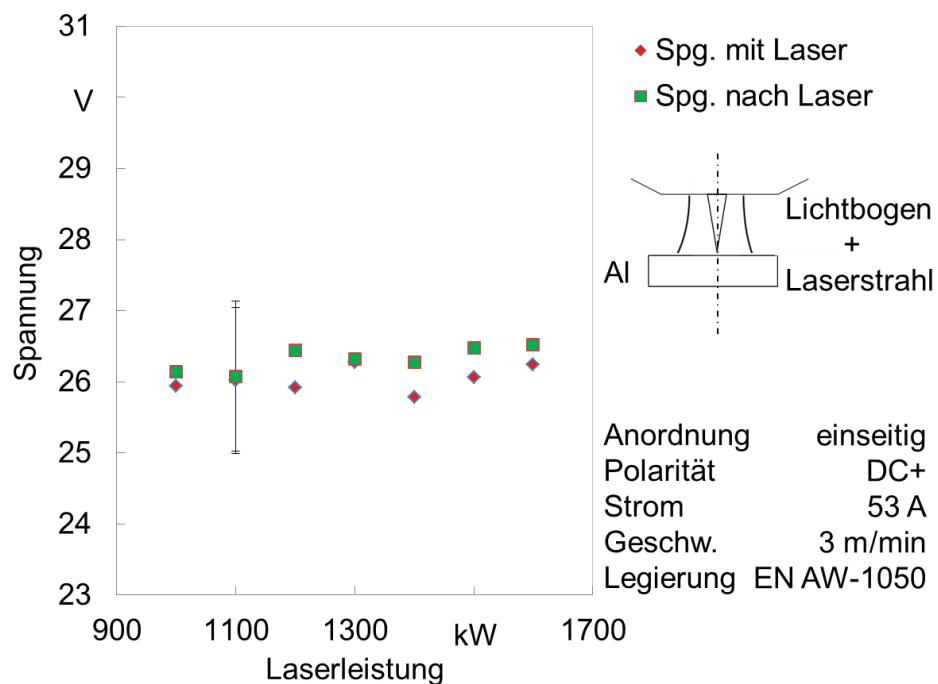
Möller 2015

BIAS ID 152378

Abbildung 5-24: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-5083

Die Untersuchungsergebnisse der Legierung EN AW-1050 in Abbildung 5-25 zeigen auf, dass der Laser bei der einseitigen Konfiguration und positiv gepolter Elektrode einen

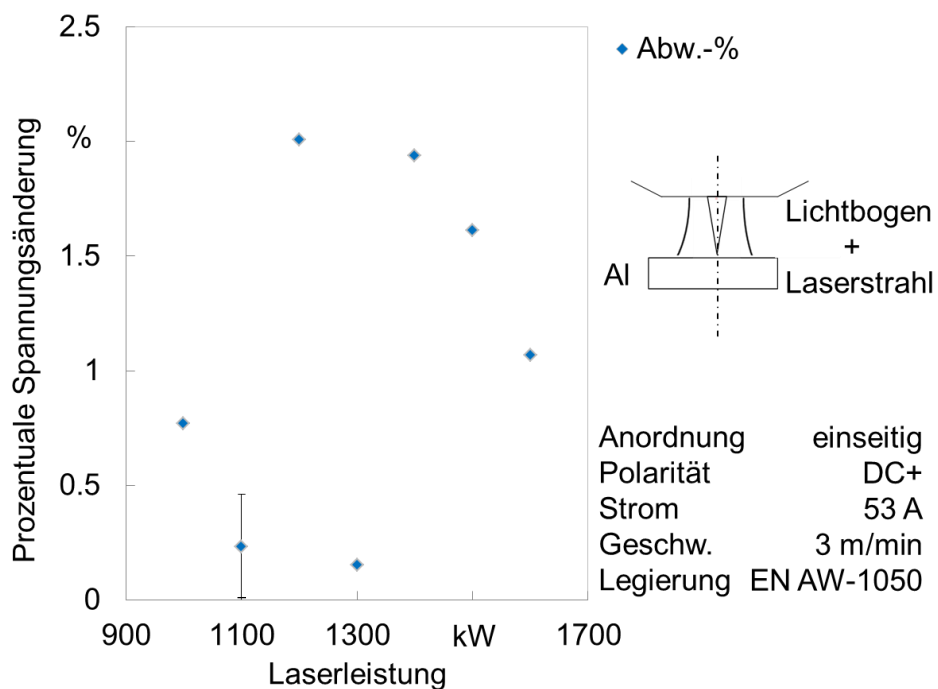
vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Spannung des Lichtbogens hat. Ab einer Leistung von 1,3 kW kann eine schwache Tendenz beobachtet werden.



Möller 2015

BIAS ID 152379

Abbildung 5-25: Einfluss der Laserleistung auf die Lichtbogenspannung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-1050



Möller 2015

BIAS ID 152380

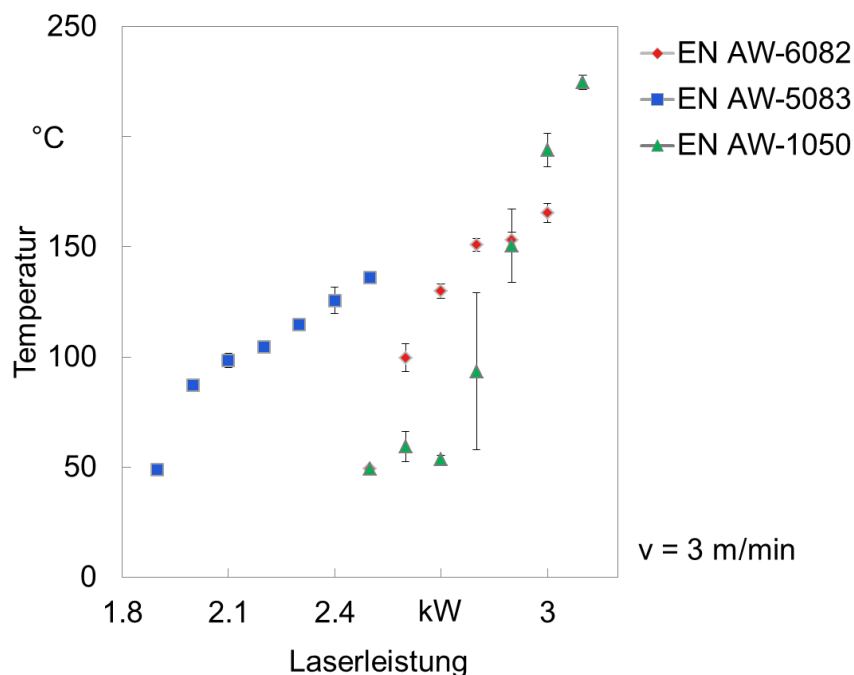
Abbildung 5-26: Prozentuale Spannungsänderung des Lichtbogens durch Einfluss der Laserleistung bei einseitiger Materialbearbeitung und positiv gepolter Elektrode auf EN AW-1050

Die prozentuale Abweichung ist mit einem Maximum von 1,75 % im Vergleich zur negativ gepolten Konfiguration deutlich niedriger. Die Werte variieren zwischen einem messbaren Einfluss und keinem nachweislichen Einfluss. Die Lichtbogenspannung folgt dabei nicht der steigenden Laserleistung.

Insgesamt sind die Versuche der einseitigen Konfiguration und positiv gepolten Elektrode deutlich geringer beeinflusst durch den Laserstrahl. Der Effekt ändert sich bei der Legierung mit dem höchsten Magnesiumanteil so weit, dass eine höhere Spannung mit Laser beobachtet werden kann.

5.2 Temperaturmessung und Berechnung der Elektronenaustrittsarbeit

In Abbildung 5-27 wird das Ergebnis der Temperaturmessung dargestellt. Die Messungen wurden ohne den Lichtbogen durchgeführt. Ab einer jeweiligen Schwellleistung des Lasers steigen die Werte steil an. Dies kann für alle hier untersuchten Legierungen beobachtet werden. Der Effekt beruht auf der Tatsache, dass sich legierungsabhängig bei unterschiedlichen Leistungen ein Keyhole ausbildet. Dieses führt zu einem deutlichen Anstieg der Absorption und damit auch der Temperatur.



Möller 2015

BIAS ID 152381

Abbildung 5-27: Temperatur an der dem Laser abgewandten Oberfläche

Der Verlauf der Kurven deckt sich mit den Beobachtungen aus dem Experiment. In Abbildung 5-28 werden die Oberflächen nach dem Einschweißen gezeigt. Es wird deutlich, dass es ab einer bestimmten Leistung zum Ausbilden einer deutlich breiteren Nahtoberfläche kommt.

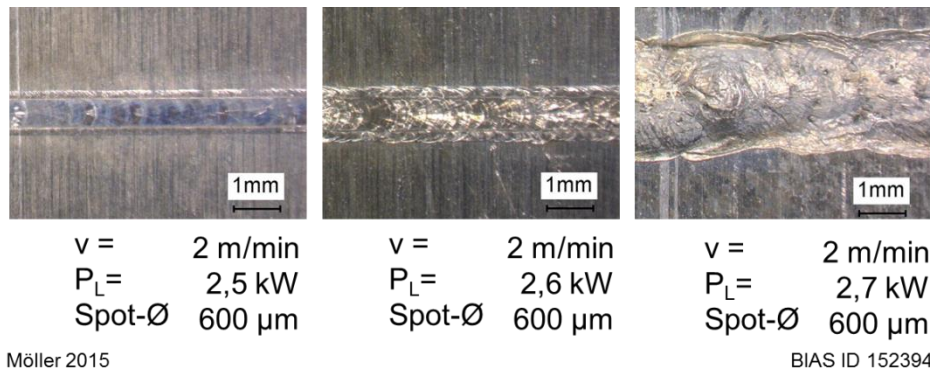
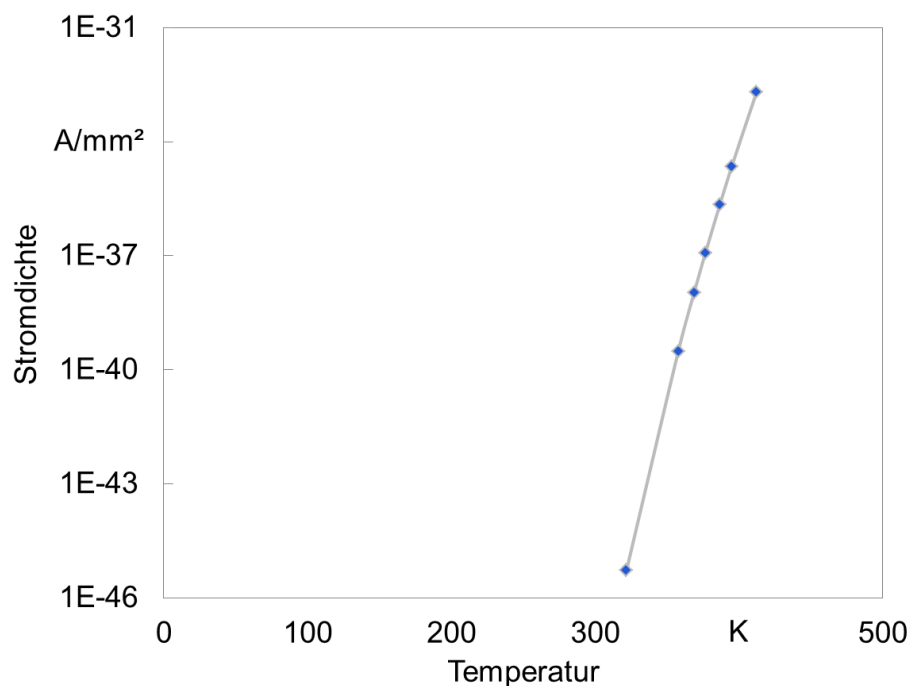


Abbildung 5-28: Oberflächen der Legierung EN AW-6082 nach dem Laserprozess mit steigender Laserleistung

Die weitere Erhöhung der Leistung führt zu einem linearen Anstieg der Temperatur. Die Ergebnisse zeigen, dass die Legierung EN AW-5083 im Vergleich zu den Legierungen EN AW-6082 und EN AW-1050 bei geringeren Leistungen die gleichen Temperaturen erreicht. Für diesen Temperaturbereich kann dann, wie im Stand der Forschung erwähnt, die thermisch bedingte Stromdichte auf der Werkstückoberfläche berechnet werden. Neben der Austrittsarbeit ist bei der Berechnung der Schottky-Effekt mit berücksichtigt worden (siehe Formel 2-2).



Möller 2015

BIAS ID 152385

Abbildung 5-29: Berechnung der thermisch induzierten Stromdichte in Abhängigkeit der Temperatur

5.3 Mechanische Bearbeitung

Die in Kapitel 4.8 beschriebene Methode resultiert in einem Längen der Oberfläche. Durch den Zusammenhang des Radius $R_K = 38,25$ mm, der Blechdicke $l = 3$ mm sowie

dem gemessenen Biegewinkel $\gamma = 33^\circ$ kann die Dehnung an der Oberfläche berechnet werden.

$$L_{N2} = \frac{\gamma}{360} \cdot 2\pi \left(R + \frac{l}{2} \right) = 22,89 \text{ mm}$$

$$L_{A2} = \frac{\gamma}{360} \cdot 2\pi (R + l) = 23,76 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{L_{A2} - L_{N2}}{L_{N2}}$$

$$\varepsilon = 0,04$$

Mittels der Dehnung kann auf die Spannung geschlossen werden, welche theoretisch an der Oberfläche vorliegt. Dies wird über den Zusammenhang zwischen Dehnung und E-Modul beschrieben. Das E-Modul entspricht dem Wert des Oxids, da dieses an der Oberfläche vorliegt.

$$\sigma_{\text{calc}} = \varepsilon \cdot E = 14 \text{ GPa}$$

mit: E-Modul_{Al₂O₃} = 350000 MPa

Da die höchste angegebene Festigkeit von Al₂O₃ bei 630 MPa liegt, können die berechneten Spannungen nicht erreicht werden. Es kommt vorher zu einem Aufreißen der Oxidschicht im Bereich des Biegeradius.

Der Verlauf des Lichtbogens auf der Probenoberfläche wird in Abbildung 5-30 demonstriert. Es kann festgestellt werden, dass im Bereich ohne Krafteinwirkung kein kontinuierlicher Nahtverlauf des Lichtbogens erreicht werden kann. Es kommt zu einem sprunghaften Ansetzen des Lichtbogens. Beim Einsetzen der Kraft wird der Lichtbogen zur Biegelinie hin fokussiert und verbleibt dort während des Biegevorganges. Es kommt zu einem kontinuierlichen Nahtverlauf.

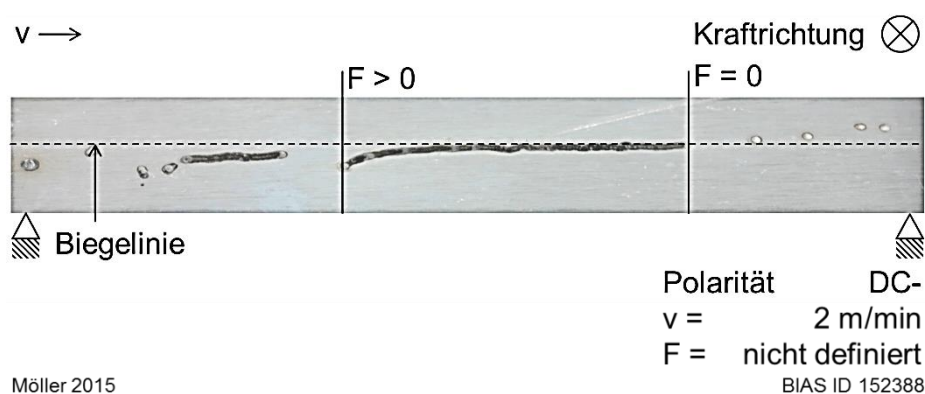
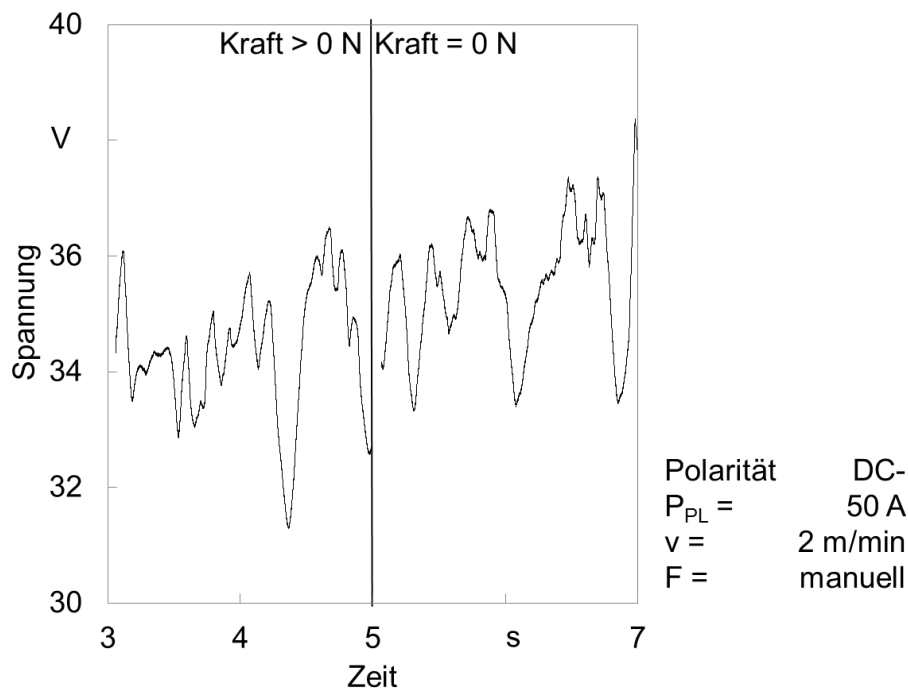


Abbildung 5-30: Lichtbogenspur auf der Aluminiumoberfläche

In Abbildung 5-31 wird die Lichtbogenspannung dargestellt. Beide Bereiche weisen eine hohe Streuung des Spannungsverlaufes auf. Für den Bereich mit Krafteinwirkung liegt der Mittelwert bei $34,32 \text{ V} \pm 1,8 \text{ V}$. Der Mittelwert für den Bereich ohne Krafteinwirkung

liegt bei $35,5 \text{ V} \pm 1,9 \text{ V}$. Durch den sprunghaften Verlauf kann daher nur eine leichte Tendenz, hinsichtlich des Einflusses der Krafteinwirkung, identifiziert werden.



Möller 2015

BIAS ID 152392

Abbildung 5-31: Lichtbogenspannung mit und ohne Krafteinwirkung

Weitere Ergebnisse des Biegeversuchs können im Anhang eingesehen werden. Hier zeigt sich, dass der Effekt nicht bei jeder Probe gleichermaßen zu beobachten ist. Die Unterschiede in der Position der Krafteinwirkung sind auf die manuelle Durchführung zurückzuführen. Diese wurden durch den Einsatz eines manuellen Triggers aufgezeichnet.

5.4 Laser-Plasma-Löten von Aluminium

Mittels des koaxialen Verfahrens kann das flussmittelfreie Löten von Aluminium umgesetzt werden. Der Vorteil des Lichtbogens liegt hier in der Entfernung der benetzungshemmenden Oxidschicht. Durch den Einsatz des Lichtbogens kann eine Benetzung des Grundwerkstoffes realisiert werden. Die Benetzungslänge des Hybridverfahrens liegt mit 2,5 mm geringfügig über denen des reinen Laserlötens mit Flussmittel, diese liegen bei 2,2 mm (Abbildung 5-32). Trotz des geringen Unterschiedes der Schmelztemperaturen von 580°C des Zusatz- und 615°C des Grundwerkstoffes kann das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes verhindert werden. Es kann eine sehr symmetrische Benetzung beobachtet werden. Zudem ist kein Flussmittel verwendet worden. Darüber hinaus bildet sich beim Hybridlöten im Vergleich zum Laserlöten mit Flussmittel ein um 30 % geringerer Anbindungswinkel aus.

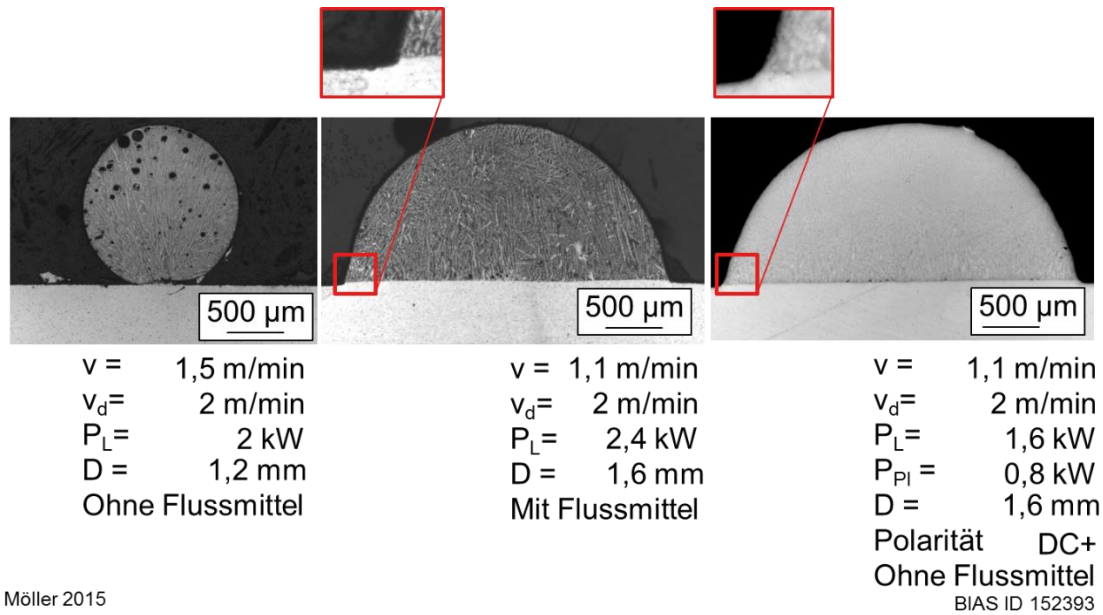
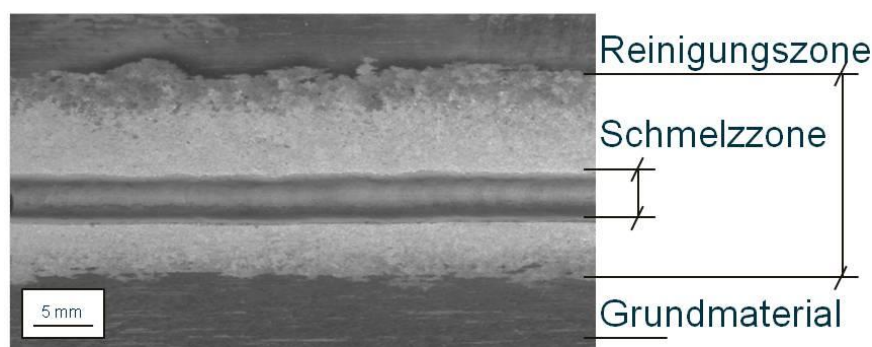


Abbildung 5-32: Ergebnisse des Laserlötens ohne Flussmittel (links), mit Flussmittel (mittig) und ohne Flussmittel mit hinzugeschaltetem Lichtbogen (rechts) der Legierung EN-AW 6016.

In Abbildung 5-33 ist eine typische Nahtoberfläche zu sehen. Es kann eine gleichmäßige Ausbildung der Reinigungszone sowie ein kontinuierlicher Nahtverlauf beobachtet werden. Der Laser stabilisiert den Lichtbogen und ermöglicht Geschwindigkeiten $> 1 \text{ m/min}$. Der Effekt eines stabilen Lichtbogens kann, durch eine an den Prozess anschließende Analyse, mittels Rasterelektronenmikroskops gezeigt werden. Beim hybriden Prozess können drei unterschiedliche Zonen beobachtet werden (Abbildung 5-33):

- Grundwerkstoff
- Reinigungszone
- Schmelzzone

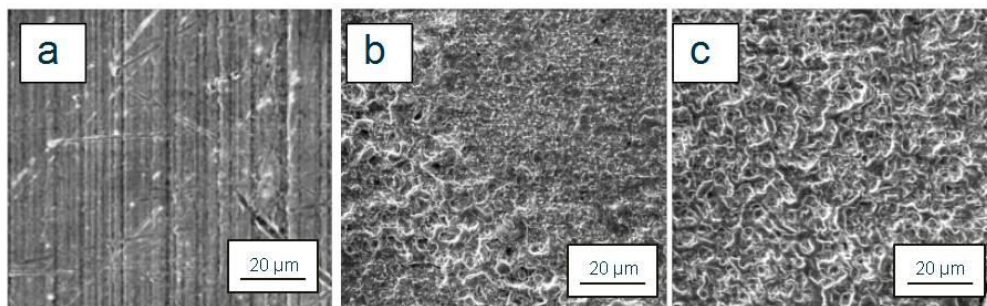


BIAS ID 110580

Abbildung 5-33: Nahtoberfläche [$P_{\text{Laser}}=1.2 \text{ kW}$, 40 A , $v_{\text{Prozess}}=1.2 \text{ m/min}$, $v_{\text{Draht}}=0.8 \text{ m/min}$]

Der Grundwerkstoff bleibt vom Prozess unbeeinflusst. Die Reinigungszone ist nur durch den Plasmaprozess beeinflusst, wobei die Schmelzzone vom Laser- und dem

Plasmaprozess beeinflusst wird. In Abbildung 5-34 werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Prozesszonen gezeigt.

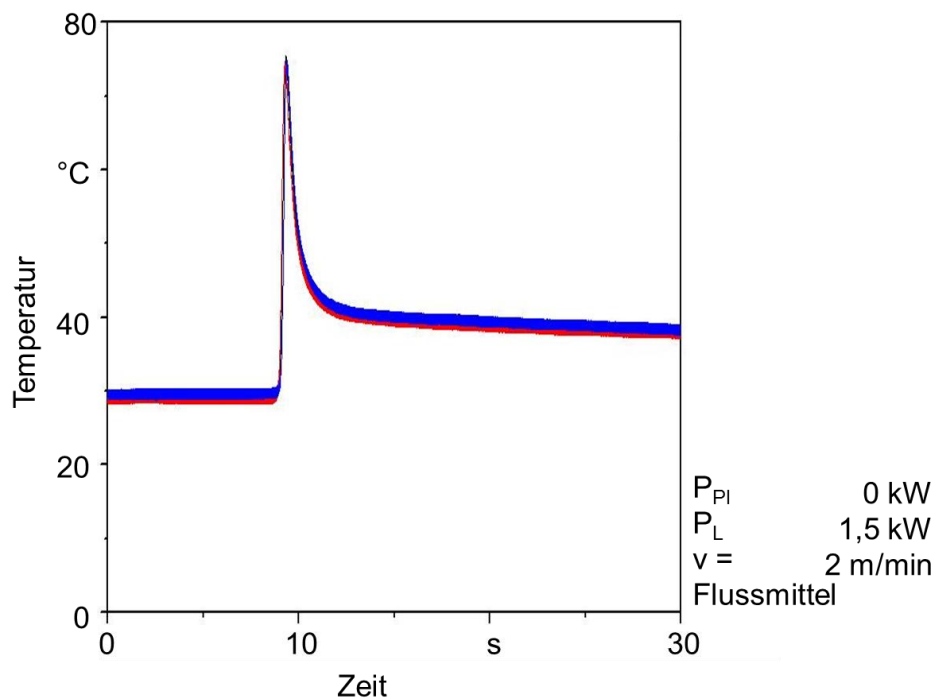


BIAS ID 110581

Abbildung 5-34: REM-Analyse des Grundwerkstoffs (a), des plasmabeeinflussten (b) und des hybriden Einflussbereichs (c)

Die Oberfläche des Grundmaterials (Abbildung 5-34a) zeigt herstellungsbedingte Kratzer und keine Beeinflussung durch den Prozess. Ein hoher Einfluss des Plasmas kann auf der Aluminiumoberfläche beobachtet werden (Abbildung 5-34b). Hier bilden sich offene Poren aus. Die Oberfläche zeigt eine erhöhte Rauheit. Darüber hinaus kann eine Ungleichmäßigkeit in der Oberflächenformation identifiziert werden. Dieser Effekt ist bedingt durch die Bewegung der Plasmasäule. In Abbildung 5-34c wird der Einflussbereich des hybriden Prozesses gezeigt. Die Messung ist direkt neben der Schmelzzone durchgeführt worden. Hier wird der Plasmaprozess durch den Laser stabilisiert und führt zu einer gleichmäßigeren Modifizierung der Oberfläche.

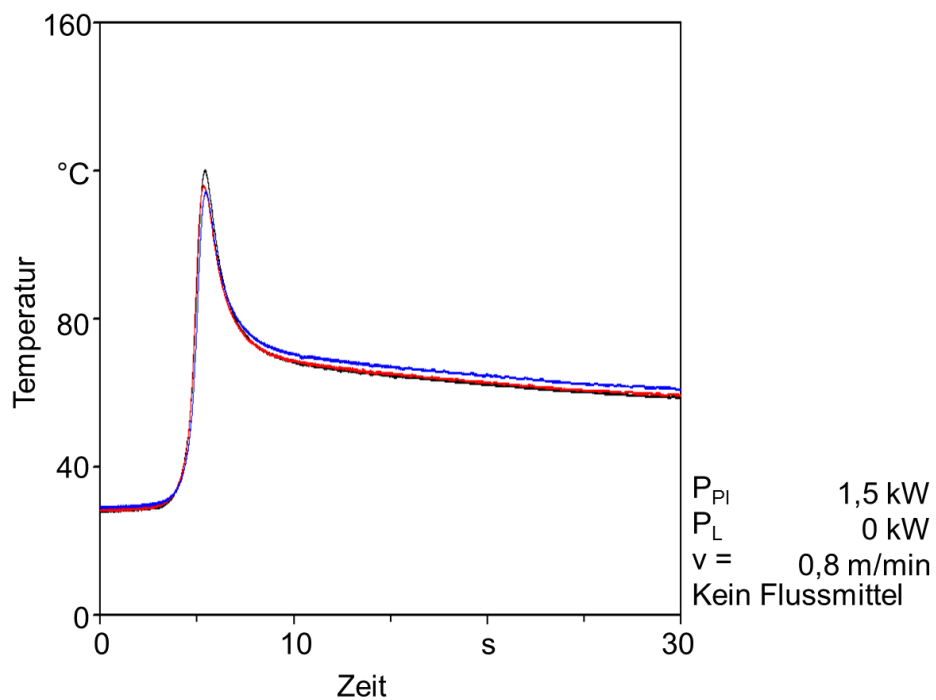
Um Aussagen zum Unterschied bzw. zu Synergieeffekten der Einzelprozesse machen zu können, wurden die Einzelprozesse mit dem Hybridprozess verglichen. Als Vergleichswert sind Temperaturmessungen wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben durchgeführt worden. Beim Laserlöten können, bei 1,5 kW Laserleistung und 2 m/min Vorschubgeschwindigkeit, Maximaltemperaturen von $75\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ gemessen werden. Um eine Benetzung des Grundwerkstoffes zu gewährleisten ist Flussmittel eingesetzt worden. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5-35 dargestellt.



Möller 2015

BIAS ID 152396

Abbildung 5-35: Temperaturverlauf beim Laserstrahllöten



Möller 2015

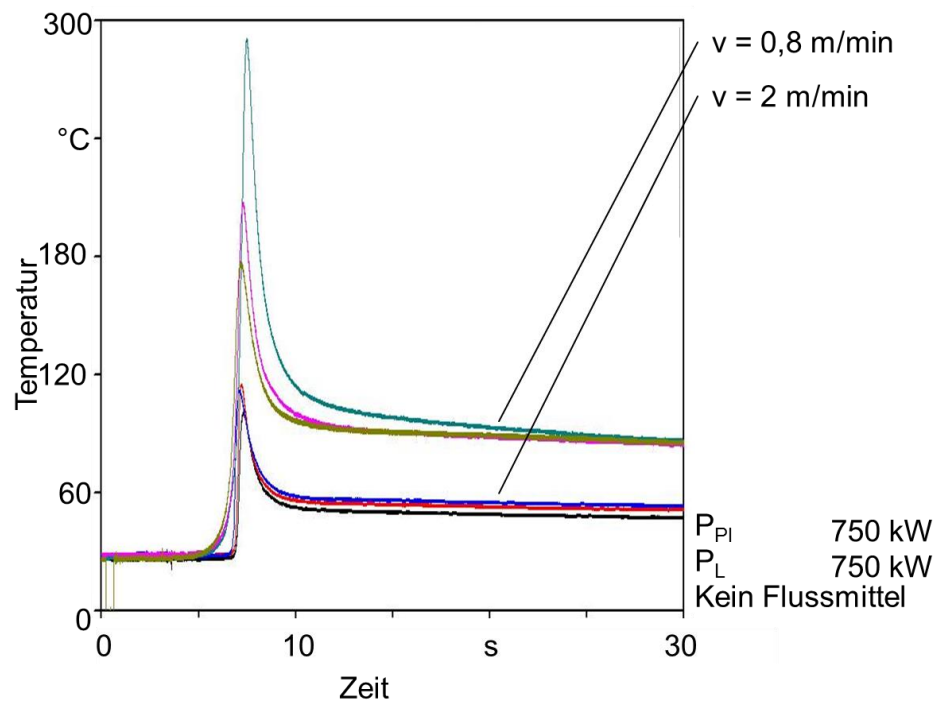
BIAS ID 152397

Abbildung 5-36: Temperaturverlauf beim Plasmalöten

Im Vergleich zum Laserlöten ist beim reinen Plasmalöten eine Reduzierung der Geschwindigkeit notwendig, um einen kontinuierlichen Prozessablauf zu gewährleisten. Die Leistung liegt auch hier bei 1,5 kW. Die Geschwindigkeit ist auf 0,8 m/min reduziert

worden. Es konnten Maximaltemperaturen von $118\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ identifiziert werden. Der Messergebnisse sind in Abbildung 5-36 dargestellt.

Beim Vergleich mit dem Hybridprozess kann deutlich eine erhöhte Temperatur bei gleicher Prozessleistung beobachtet werden.



Möller 2015

BIAS ID 152398

Abbildung 5-37: Temperaturverlauf beim Laser-Plasma-Hybridlöten

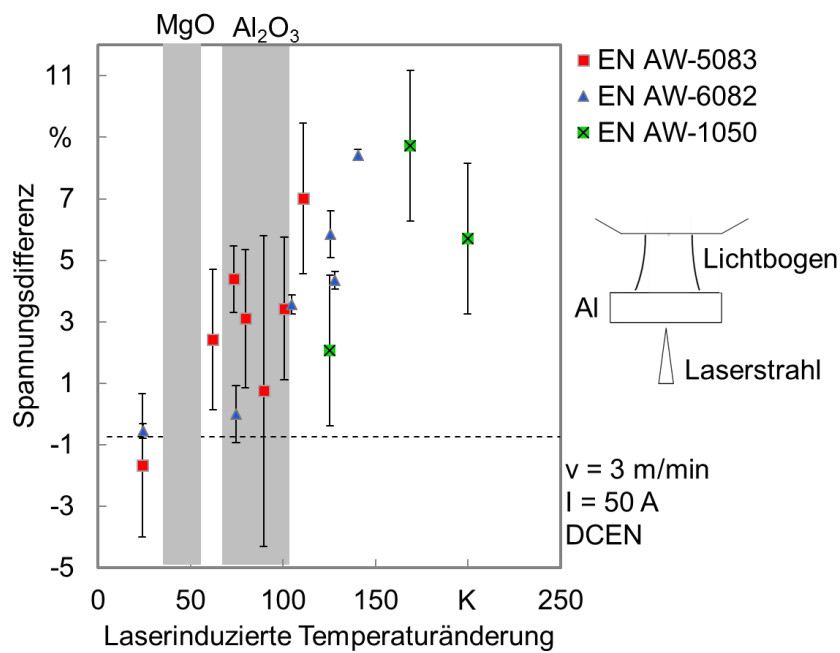
Bei einer Geschwindigkeit von 2 m/min kann im Vergleich zum reinen Laserstrahllöten eine um 60 % höhere Temperatur gemessen werden. Bei 0,8 m/min beträgt die Steigerung im Maximum 137 %.

6 Interaktion zwischen beeinflusster Oberfläche und Lichtbogen

Der Stand der Technik verdeutlicht, dass der Lichtbogen bei positiver gepolter Elektrode stabiler brennt. Dieser Effekt wird dadurch erklärt, dass der Lichtbogen primär an Stellen mit unterschiedlichen Potentialen ansetzt. Diese Unterschiede können durch Feldlinienverzerrungen entstehen. An Übergangspunkten von Aluminiumoxid auf Aluminium, die durch die Reinigungswirkung des Lichtbogens entstehen, kommt es zur Verzerrung der Feldlinien. Der Strompfad des Lichtbogens wird begünstigt und der Lichtbogen brennt stabiler. Bei der negativ gepolten Elektrode kommt es nicht zu dieser Reinigungswirkung durch den Lichtbogen, da die kathodische Oberflächenreinigung, bedingt durch die Richtung der Elektronen, auf der Elektrode stattfindet. In den Ergebnissen zeigt sich bei dieser Polarität eine signifikant größere Beeinflussung des Lichtbogens durch den Laserstrahl. Es soll daher die Hypothese erkundet werden, ob der zugeschaltete Laser bei negativer Elektrode die Oxidschicht des Grundbleches in der Art beeinflusst, dass diese thermisch induziert partiell abplatzt bzw. aufreißt.

In den Experimenten dieser Arbeit kommt es durch das Zuschalten des Laserstrahls auf der Rückseite zu einer lokal begrenzten Erwärmung des Grundmaterials, unter Vermeidung weiterer möglicher Effekte wie der direkten Laser-Lichtbogen-Interaktion. Die Temperaturmessungen zeigen den Maximalwert der Temperatur auf der gegenüberliegenden Seite des Laserprozesses (Kapitel 4.4.3). Der anfangs steile Anstieg der Temperatur aus Abbildung 5-27 zeigt sich auch bei Betrachtung der Schweißnähte (Abbildung 5-28) deutlich. Hierbei kommt es zum Übergang vom Wärmeleitschweißen zum Tiefschweißen. Das bedeutet, dass deutlich mehr Laserleistung absorbiert wird und daher auch die Temperatur sprunghaft ansteigt. Zur Erreichung ähnlicher Temperaturen werden bei gleichseitiger Bearbeitung nur 10% der Laserleistung des beidseitigen Falls benötigt.

In Abbildung 6-1 wird die laserinduzierte Temperaturänderung gegenüber der prozentualen Spannungsdifferenz für die einzelnen Legierungen aufgetragen. Es wird in den Ergebnissen deutlich, dass der Einfluss des Lasers nicht ab Raumtemperatur kontinuierlich ansteigt. Bei allen untersuchten Legierungen und Konfigurationen kann dies erst ab einer spezifischen Laserleistung beobachtet werden.



Möller 2015

BIAS ID 152382

Abbildung 6-1: Spannungsdifferenz in Abhängigkeit der Temperatur mit Bezug auf die temperaturinduzierten Oxidaufreißbereiche (grau)

Ein Grund dafür könnte der Effekt des thermisch induzierten Aufplatzens der Oxidschicht sein, welche erst ab einer definierten Temperatur starten würde. Die prozentualen Spannungsverläufe zeigen jeweils bei 0 % die Grenze des messbaren Einflusses der Laserleistung. Durch die empirischen Regressionsgleichungen kann bestimmt werden, bei welcher Temperatur (T) der Einfluss des Lasers nicht mehr nachweisbar ist:

$$dU(T_{\text{EN AW-5083}}) = 4,17 \cdot \ln(x) - 14,963$$

$$T_{\text{EN AW-5083}} = 36,22 \text{ °C bei } dU = 0 \%$$

$$dU(T_{\text{EN AW-6082}}) = 11,558 \cdot \ln(x) - 50,104$$

$$T_{\text{EN AW-6082}} = 76,5 \text{ °C bei } dU = 0 \%$$

$$dU(T_{\text{EN AW-1050}}) = 9,5 \cdot \ln(x) - 42,8$$

$$T_{\text{EN AW-1050}} = 90,5 \text{ °C bei } dU = 0 \%$$

Deutlich zeigt sich, dass die einzelnen Legierungen unterschiedliche Werte aufweisen. Insbesondere ist ein Unterschied zwischen der Legierung EN AW-5083 und den anderen beiden zu beobachten. Dieser Effekt kann auf das thermische Aufbrechen der Oxidschicht, basierend auf dem zusätzlichen Energieeintrag durch den Laser, hindeuten. In Abbildung 6-2 wird schematisch die Auswirkung einer lokalen Energieeinbringung dargestellt.

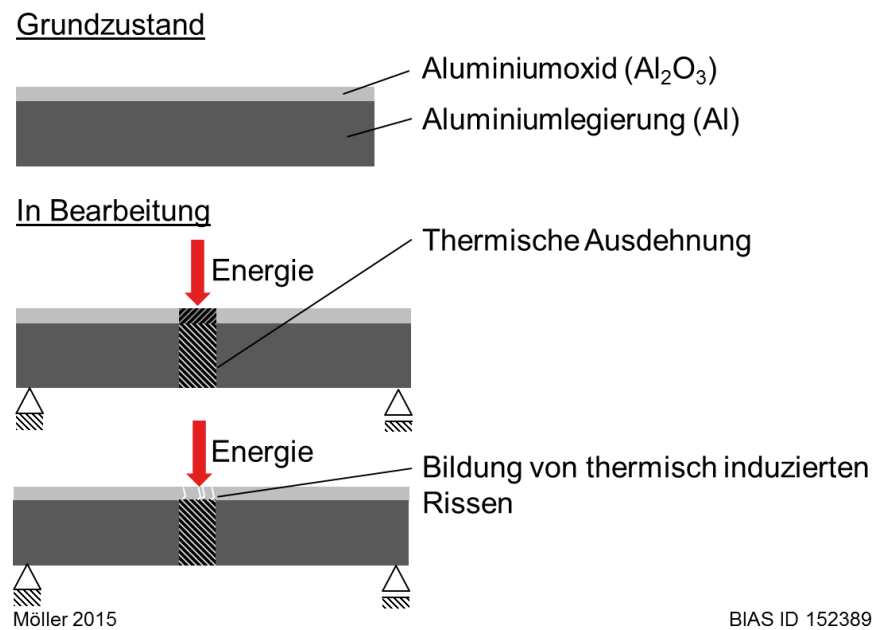


Abbildung 6-2: Mechanismus zum thermischen Aufbrechen der Oxidschicht

Durch die thermische Energie kommt es zur Ausdehnung des Materials. Im Falle von Materialverbunden wird die Gesamtspannung durch eine Berechnung der Einzeldehnungen der Materialien gebildet. Dies gilt, solange beide Materialien ähnliche Blechdicken (t) haben. Im hier vorliegenden Fall gilt allerdings:

$$t_{\text{Al}} \gg t_{\text{Oxid}}$$

Die Gesamtdehnung des Materialverbundes kann daher unter dieser Voraussetzung als die des Aluminiums angenommen werden. Die thermisch bedingte Dehnung des Aluminiums, prägt der Oxidschicht somit eine Dehnung auf (ϵ_{Alu}). Dieser Dehnung wirkt die thermische Dehnung des Oxids (ϵ_{Oxid}) entgegen. Die Differenz der beiden Dehnungen ergibt somit die Gesamtdehnung des Materialverbundes.

$$\epsilon_{\text{ges}} = \epsilon_{\text{Alu}} - \epsilon_{\text{Oxid}}$$

Damit kann die Spannung im Material über den Zusammenhang aus thermischer Dehnung (α) und der Temperaturdifferenz ($T_{\text{Ende}} - T_{\text{Anfang}}$) bestimmt werden (Gl. 6-1).

$$\epsilon_{\text{ges}} = (T_{\text{Ende}} - T_{\text{Anfang}}) \cdot (\alpha_{\text{Alu}} - \alpha_{\text{Oxid}}) \quad 6-1$$

Durch die thermische Ausdehnung im Material kommt es, basierend auf den unterschiedlichen Materialeigenschaften wie dem E-Modul (E_{Oxid}), zur Ausbildung unterschiedlicher Spannungen in den Schichten. Die thermische Spannung σ_{therm} kann über den Zusammenhang aus Gl. 6-2 bestimmt werden.

$$\sigma_{therm} = E_{Oxid} \cdot \varepsilon_{ges} \quad 6-2$$

Überschreitet die thermische Spannung die Festigkeit des Grundmaterials, kann es zu Bauteilschädigungen wie Rissen kommen. Als Vergleichswert für die Festigkeit des Oxids wird die Biegefestigkeit keramischer Proben herangezogen, welche die maximale Zugspannung im Biegeversuch entspricht. Daher kann durch die Definition von

$$\sigma_{therm} = \sigma_{crit} = \text{Festigkeit}$$

die kritische Temperaturänderung mit folgenden Werten (Tabelle 9 und Tabelle 4) bestimmt werden.

$$\frac{\sigma_{therm}}{E_{Oxid}(\alpha_{Al} - \alpha_{Oxid})} = (T_{Ende} - T_{Anfang}) = \Delta T_{Oxid} \quad 6-3$$

Tabelle 9: Physikalische Eigenschaften der Oxide [Azo15][Ost07][Met10]

	Al ₂ O ₃		MgO	
	dT _{min}	dT _{max}	dT _{min}	dT _{max}
E-Modul in Mpa	406000	350000	330000	250000
Biegefestigkeit in Mpa	290	630	83.3	166.7
therm. Ausdehnung in 1/K	8.90E-06	6.50E-06	9.00E-06	1.20E-05

Die Temperaturen liegen für die untersuchten Legierungen in unterschiedlichen Bereichen, da sich verschiedene Oxide an der Oberfläche ausbilden. Für die zwei Oxidarten ist jeweils die kritische Temperatur (Gl. 6-3) bestimmt worden. Aus dem jeweils Maximal- und Minimalwert der Oxide kann der Mittelwert mit der maximalen Abweichung bestimmt werden.

$$\Delta T_{Al_2O_3} = 80,9 \text{ K} \pm 41,1 \text{ K}$$

$$\Delta T_{MgO} = 37,7 \text{ K} \pm 20,3 \text{ K}$$

Die Streuung der Bereiche ist auf die stark unterschiedlichen Angaben zu Festigkeit und E-Modul in der Literatur zurückzuführen. Die Abweichung des Mittelwerts zu den gemessenen Werten entspricht 5,5 % beim Al₂O₃ sowie 3,9 % bei MgO. Trotz dieses sehr einfachen Ansatzes stimmen die berechneten und gemessenen Werte fast überein. Die möglichen Einflussfaktoren die den Wert verfälschen könnten sind zum einen die hohe Streuung der berechneten Werte sowie zum anderen experimentelle Abweichungen der Temperatur, der Schichtdicke und –zusammensetzung sowie der damit verbundene Wert der Oxidfestigkeit. Die gemessene Temperatur zeigt lediglich die laserinduzierte Temperatur an. Der zusätzliche Lichtbogen an der Werkstückoberseite bringt ebenfalls Energie ins Werkstück ein. Hier können Abweichungen von ca. 1 % auftreten, wie in [Sei06] beschrieben. Eine Verschiebung der Werte zu höheren Temperaturen wäre das Ergebnis. Ebenfalls konnten Ergebnisse in [Syv04] zeigen, dass die Festigkeit einer dünnen Oxidschicht einen Einfluss hat, der hier nicht berücksichtigt wird. Er konnte

zeigen, dass eine infinitesimal dünne Schicht deutlich geringe Festigkeiten besitzt als eine Schicht mit 10 nm. Da in dieser Arbeit die Schichtdicke nicht bestimmt wird und diese während des Prozesses durch den Lichtbogen stark beeinflusst wird, ist ein Einfluss der Schichtdicke nicht auszuschließen. Darüber hinaus entsteht eine Beeinflussung der Festigkeit mit steigender Temperatur. In [Kah85] zeigte sich, dass die Festigkeit für Temperaturen oberhalb 750°C ansteigt. Der Effekt konnte zwar gezeigt werden, aber noch keine Gesetzmäßigkeit für den Zusammenhang aus Festigkeit, Zeit und Schichtdicke ermittelt werden. Die Untersuchungen beschäftigten sich mit dem Gießen von Aluminium und daher für flüssiges Aluminium und Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur. Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall liegen die Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes.

In Abbildung 6-1 sind die berechneten Bereiche grau eingefärbt. Das bedeutet, dass ab diesen Temperaturunterschieden die Oxidschichtfestigkeit durch die thermisch induzierte Spannung überschritten wird und es daher innerhalb der Oxidschicht zu Rissen kommen kann. Durch das lokale Aufbrechen kommt es zu Feldverzerrungen, die den Lichtbogen zum einen zur Wirkzone des Lasers hin fokussiert, zum anderen sinkt die Lichtbogenspannung auf den Wert oxidfreien Aluminiums ab. Zudem wird aufgrund der entstehenden Aluminium-Aluminiumoxidkanten der Lichtbogen, wie bereits im Stand der Forschung mehrfach nachgewiesen, stabilisiert. Der sich ausbildende geradlinige Verlauf wird durch die feste Position der Laserwirkzone bestimmt. Der Lichtbogen richtet sich an dieser aus.

Bei der Legierung EN AW-5083 ist eine Spannungsdifferenz bereits unterhalb einer Temperaturdifferenz von 70 K zu beobachten. Dies lässt darauf schließen, dass durch die Ausbildung von MgO-Schichten ein früheres Aufreißen zu beobachten ist. Bei den Legierungen EN AW-6082 und EN AW-1050 wird die Beeinflussung erst bei Temperaturen sichtbar, bei denen es zum Aufreißen der Al_2O_3 -Schicht kommt. Insbesondere beim Reinaluminium zeigt sich, dass ab dem Bereich des Aufreißen der Einfluss auf den Prozess absinkt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass der Lichtbogen im hier untersuchten Temperaturbereich ohne den Einfluss von Metaldampf durch ein Aufreißen der Oxidschicht beeinflusst wird. Mit steigender Laserleistung reißen auch die Oxide weiter auf und führen so zu einem kontinuierlichen Anstieg. Ebenfalls kann es mit steigender Laserleistung zu ersten Verdampfungen an der Oberfläche kommen die ebenfalls ein Absinken der Spannung bewirken würden. Der in dieser Arbeit betrachtete Ansatz berücksichtigt keine Verdampfungsprozesse.

Ein ähnliches Phänomen ist auch durch den bekannten Pilling-Bedworth-Effekt beschrieben. Dieser sagt aus, dass durch thermisch induzierte Zugspannungen in der Oberfläche Risse entstehen können und somit eine Neuoxidierung des Materials möglich

ist. Die hier verwendeten Legierungen sind während des Prozesses weitestgehend von atmosphärischem Sauerstoff abgeschirmt. Die Risse in der Oberfläche bilden damit nur verlangsamt eine neue Oxidschicht aus. Für Aluminium zu Aluminiumoxid liegt das Verhältnis bei 1,28. Die Aluminiumoxidschicht kann demnach ohne externe Einwirkung als rissfrei angesehen werden. Durch die thermische Beeinflussung durch den Laser kommt es erst zum Aufreißen der Schicht und damit zur Beeinflussung des Lichtbogens.

Die Ergebnisse aus dem mechanischen Modellversuch zeigen vereinzelt den Effekt des Aufreißen der Oxidschicht. Solange die Kraft auf die Blechprobe wirkt, kommt es dabei zu einem Aufreißen der Oberfläche. Es zeigt sich, dass der Lichtbogen zur Biegelinie des Werkstücks hin fokussiert und die Ausbildung eines kontinuierlichen Nahtverlaufes erreicht werden kann. Dies lässt auf eine Beeinflussung des Lichtbogens schließen. Durch die Fokussierung auf die Biegelinie kann davon ausgegangen werden, dass dort bessere Bedingungen für den Lichtbogen herrschen, die nicht thermisch erklärt werden können. Auch geometrisch kann der Effekt nicht erklärt werden. Bei der Betrachtung der Biegepositionen in Abbildung 6-3 zeigt sich, dass nach der Krafteinleitung eine Biegekante im Blech zurückbleibt, der Lichtbogen aber wieder instabil wird bzw. keine kontinuierliche Naht zu beobachten ist.

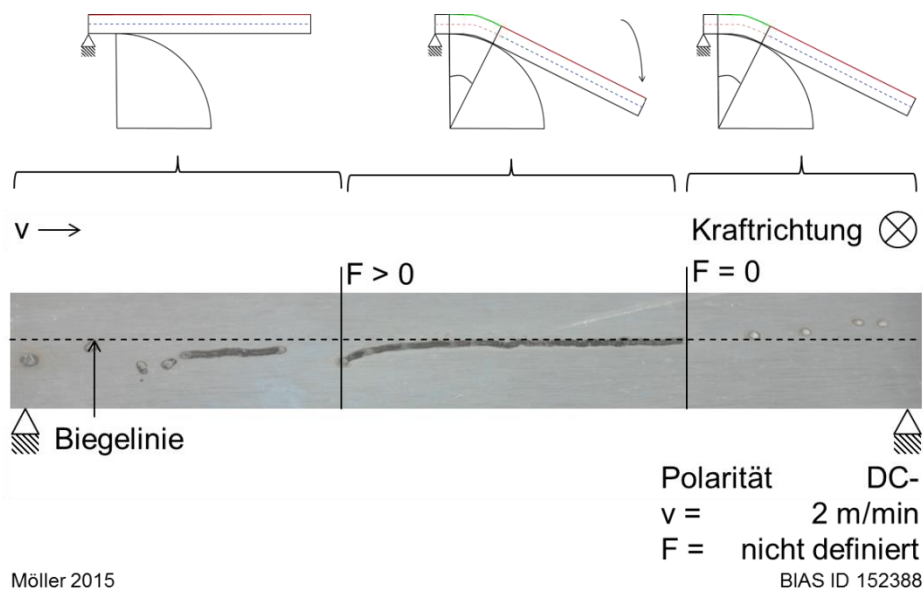


Abbildung 6-3: Biegeprobe mit schematischer Biegeposition

Die geringe Reproduzierbarkeit der Versuche kann mit den auftretenden Effekten im Prozess erklärt werden. Der Einfluss der Wärmezone verringert den Effekt der Biegung, sodass die Geschwindigkeit der Biegung höher sein muss als das vorlaufende Temperaturfeld. Zudem kann es zu Rissbildung im Material kommen. Beide Effekte konnten während der Versuche beobachtet werden. Die gezeigte Probe wies allerdings weder eine Rissbildung noch eine Durchschmelzung auf. Ein Aufreißen der Oxidschicht,

bedingt durch die Längung der Oberfläche durch den Biegeradius, ist daher wahrscheinlich.

Weitere Erkenntnisse können auch aus dem Vergleich der Beeinflussung bei positiver und negativer Elektrode gezogen werden. Grund dafür ist die kathodische Reinigungswirkung des Lichtbogens bei positiv gepolter Elektrode. Das bedeutet, dass im Falle einer DCEP-Konfiguration der Lichtbogen die Oxidschicht auf der Aluminiumoberfläche entfernt. Bei der Annahme, dass der Laser die Oxidschicht aufbricht, würde der Einfluss bei einer gereinigten Oberfläche deutlich kleiner ausfallen. Dazu werden die Ergebnisse der gemessenen Spannungen aller verwendeten Legierungen ohne Laserstrahlung aus Abbildung 6-4 betrachtet. Es zeigt sich, dass die gemessene Spannung ohne Laser sehr von der verwendeten Legierung abhängt. Zudem konnte eine geringere Spannung bei einer DCEP-Konfiguration als bei einer DCEN-Konfiguration gemessen werden. Dies kann zwei Gründe haben. Zum einen dreht sich bei der Einstellung unterschiedlicher Polungen auch die Bewegungsrichtung der Elektronen um. Dies hat zur Folge, dass die Elektronen nur die Austrittsarbeit des dotierten Wolframs überwinden müssen, welche deutlich niedriger ist als die des Aluminiums. Um den Einfluss der Austrittsarbeit des Wolframs zu vernachlässigen, werden auch hier relative Spannungen verglichen. Zum anderen ist der Widerstand des reinen Aluminiums deutlich niedriger als der Widerstand des Aluminiumoxides. Bedingt durch den geringen Widerstand ist die benötigte elektrische Spannung ebenfalls niedriger.

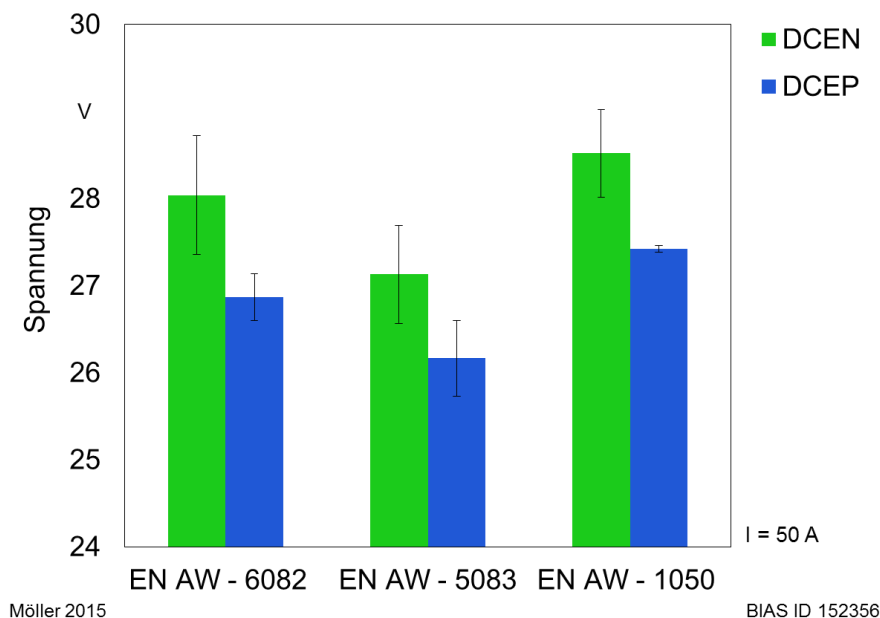


Abbildung 6-4: Einfluss der Legierung und der Polung auf die Lichtbogenspannung im Bereich ohne Laserstrahl

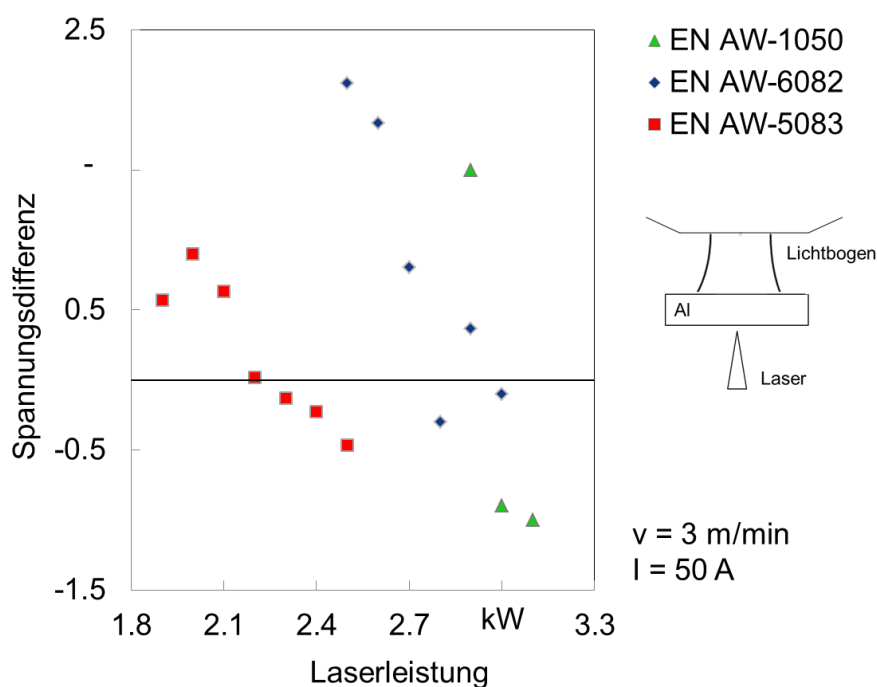
Der Effekt kann durch die Einbeziehung der physikalischen Eigenschaften der Legierungen erklärt werden. Diese zeigen, dass eine klare Abgrenzung der Wärme- und

elektrischen Leitfähigkeiten zwischen den Legierungen besteht. Das Grundmaterial EN AW-1050 hat dabei mit 210 – 220 W/mK die höchste Wärmeleitfähigkeit. Die Legierungen EN AW-6082 und EN AW-5083 folgen dann mit 170 – 220 W/mK bzw. 110 – 140 W/mK. Dieser Trend bestätigt sich ebenfalls in den Spannungen.

Zur Klärung der Frage, ob der Laser die Oxidschicht aufbricht und damit den Lichtbogen beeinflusst, wird in Abbildung 6-5 der Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Elektrodenpolungen bei der beidseitigen Konfiguration gezeigt. Die Spannungen sind während der Wirkzeit des Lasers aufgenommen. Um einen Vergleich realisieren zu können, werden nur die Spannungsunterschiede durch das Hinzuschalten des Laserstrahls verglichen. Die Spannungsdifferenz ergibt sich aus:

$$dU = U_{EN} - U_{EP} \quad 6-4$$

Die Differenzspannungen sind für die drei untersuchten Legierungen aufgetragen. Der Bereich der Laserleistung ergibt sich aus den Überschneidungen der Bereiche, in denen Wechselwirkungen bei beiden Konfigurationen beobachtet werden können.



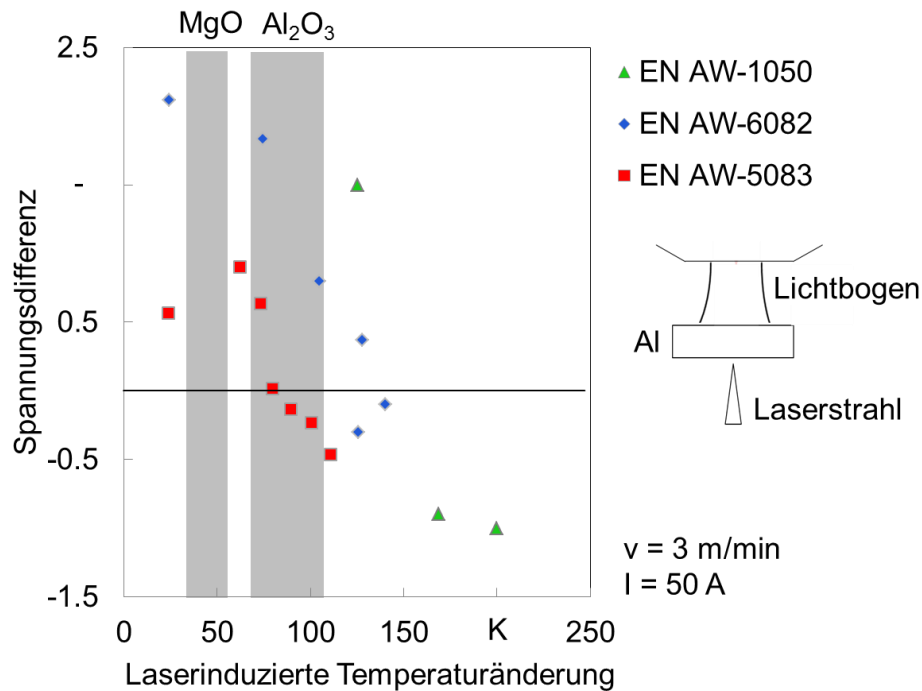
Möller 2015

BIAS ID 152383

Abbildung 6-5: Spannungsdifferenz der laserinduzierten Spannungsabnahme zwischen EN und EP-Polung unterschiedlicher Legierungen

Es wird deutlich, dass die Differenz der Spannung mit zunehmender Laserleistung abnimmt. Im Nulldurchgang hatten beide Konfigurationen die gleiche Spannung. Im Bereich der negativen Spannungsdifferenz ist die Spannung der positiv gepolten Elektrode höher als die der negativen. Es kann daraus geschlossen werden, dass die Spannung bei negativer Elektrode sich mit steigender Laserleistung der Spannung einer

positiv gepolten Elektrode, d.h. einer gereinigten Oberfläche, annähert. Folglich kommt es durch Einwirkung des Laserstrahls zu einem thermisch induzierten Reinigungseffekt an der Aluminiumoberfläche. Die Ergebnisse können mit den Temperaturmessungen aus Abbildung 5-27 korreliert werden (Abbildung 6-6:). Die markierten Flächen stellen die Bereiche dar, in denen es zur Rissbildung bei den unterschiedlichen Oxiden kommt.



Möller 2015

BIAS ID 152384

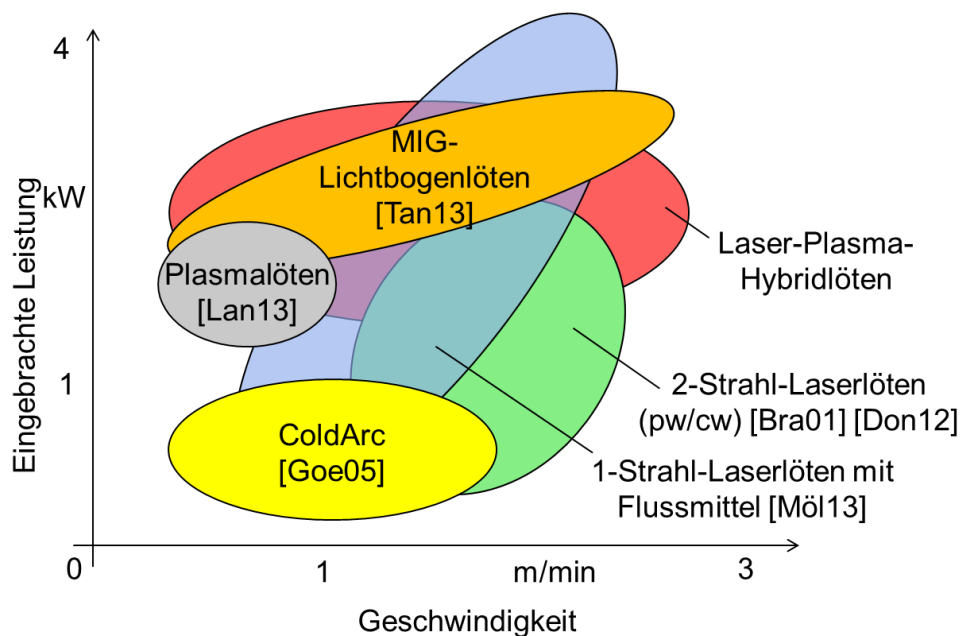
Abbildung 6-6: Spannungsdifferenz zwischen EN und EP-Polung unterschiedlicher Legierungen bezogen auf die Temperatur

Insbesondere bei der Legierung EN AW-5083 zeigt sich, dass die Beeinflussung des Laserstrahls, nachdem die MgO-Schicht vollständig abgelöst ist, deutlich abnimmt bzw. auf das Niveau der gereinigten Oberfläche absinkt. Die Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass die Spannung des negativ gepolten Lichtbogens durch eine steigende Temperatur auf die Spannung des positiv gepolten Lichtbogens absinkt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass durch eine steigende Temperatur die Oxidschicht lokal aufgebrochen werden kann.

Alle untersuchten Effekte weisen darauf hin, dass der stabilisierende Effekt nur bei Aluminiumlegierungen zu finden ist. Im Stand der Forschung wurden ebenfalls Ergebnisse auf Stahlwerkstoffen beschrieben [Sch09]. Diese konnten keine stabilisierende Wirkung durch den Laserstrahl feststellen, was den hier nachgewiesenen Effekt der Oxidschicht bestätigt.

7 Laser-Plasma-Hybridlöten von Aluminiumlegierungen

Die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können auf einen Produktionsprozess angewendet werden. Es wird dargestellt, dass mit dem entwickelten hybriden Arbeitskopf ein flussmittelfreies Löten von Aluminiumlegierungen realisiert werden kann. Zunächst kann gezeigt werden, dass ohne zusätzliche Maßnahmen ein reines Laserstrahllöten nicht möglich ist. Diese Tatsache wird auch im Stand der Forschung beschrieben und deckt sich somit mit den Erwartungen. Durch ein vorheriges Auftragen von Flussmittel kann die Aluminiumoberfläche vom Oxid befreit werden, und eine Benetzung mit dem Lotwerkstoff wird ermöglicht. Verfahrensschritte wie Auftrag des Flussmittels, Trocknung sowie die anschließende Reinigung reduzierten trotz der hohen Fügegeschwindigkeit die Effizienz des Verfahrens. Durch einen hinzugeschalteten Lichtbogenprozess kann ebenfalls eine Benetzung realisiert werden. Durch den hier umgesetzten Entfall des Flussmittels kann die Prozesskette verkürzt werden. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass selbst ohne aufwendige Prozessoptimierungen die Prozessgeschwindigkeit gegenüber konventionellen Plasmalötnähten verdoppelt werden kann. Der Vergleich zeigt, in wie weit das hier umgesetzte Verfahren, in den Stand der Forschung eingeordnet werden kann (Abbildung 7-1).



Möller 2015

BIAS ID 152401

Abbildung 7-1: Einordnung des Verfahrens zu weiteren Verfahren zum Aluminiumlöten

Durch die Kombination beider Verfahren können im Vergleich zu anderen Verfahren höhere Fügegeschwindigkeiten erreicht werden. Allerdings ist eine erhöhte Einbringung der Leistung notwendig. Mittels des 2-Strahl-Lötens können zwar ähnliche

Geschwindigkeiten erreicht werden, allerdings sind durch den Einsatz eines zweiten Lasers die Investitionskosten höher.

Des Weiteren zeigt sich, dass der Laser- und Plasmaprozess hinsichtlich ihrer Energieeinbringung ins Werkstück nicht superpositioniert werden kann. Die jeweiligen Einzelprozesse erreichen deutlich niedrige Maximaltemperaturen. Dies kann bezogen auf den Laserstrahl zwei Gründe haben:

- Steigerung der Absorption durch eine erhöhte Temperatur
- Steigerung der Absorption durch Beeinflussung der Oberflächentopographie

Durch den Einsatz eines Plasmalichtbogens kommt es zu einem Vorwärmen der Blechoberfläche, was zu einer Steigerung der Absorption der Laserstrahlung auf Aluminium führt. Dieser Zusammenhang wurde bereits in [Sei06] grundlegend untersucht. Die dort durchgeführten Untersuchungen weisen einen Anstieg von $< 1\%$ auf. Im Fall der Oberflächenveränderung können Erhöhungen von $> 30\%$ nachgewiesen werden [Sai06]. Die Beeinflussung der Oberfläche zeigt sich in Abbildung 5-34.

Bezogen auf den Lichtbogen kommt es wie oben gezeigt zu einem Fokussieren auf die Laserwirkzone. Durch diesen Effekt kommt es zur Steigerung der Energiedichte auf der Aluminiumoberfläche und damit zum lokalen Anstieg der Temperatur. Somit zeigt sich auch hier ein synergetischer Effekt der beiden Einzelprozesse.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit erweitert den Kenntnisstand im Bereich der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl- und Lichtbogenprozess auf Aluminiumbasiswerkstoffen. Dazu wird zunächst auf die Entwicklung eines koaxialen Bearbeitungssystems eingegangen, welches es ermöglicht, Untersuchungen zur Beeinflussung des Lichtbogens durch den Laserstrahl durchzuführen. Die Arbeit knüpft dabei an die im Stand der Forschung beschriebene Fragestellung und Diskussion zum dominierenden Effekt der Stabilisierung des Lichtbogens an. Um den Effekt der direkten Wechselwirkung der Einzelprozesse auszuschließen, wurden die Verfahren charakterisiert sowie ein zweiseitiger Versuchsaufbau realisiert, um die Effekte zu separieren. Zur Umsetzung wurde ein lokales Temperaturfeld mittels des hinzugeschalteten Laserprozesses generiert.

Es wird durch sechs unterschiedliche Methoden der Effekt des thermisch induzierten Aufbrechens der Oxidschicht innerhalb der Lichtbogenwirkzone nachgewiesen.

1. Spannungsänderung durch Hinzuschalten des Laserstrahls
2. Laserinduzierte Maximaltemperatur in der Plasmawirkzone
3. Unterschied zwischen positiver und negativer Elektrodenpolung
4. Mechanisches Aufbrechen der Oxidschicht
5. Berechnung der kritischen Risstemperatur
6. Einbeziehung des Pilling-Bedworth-Verhältnisses

1. Es kann beobachtet werden, dass es grundsätzlich zu einem Absenken der Spannung durch den hinzugeschalteten Laserstrahl kommt. Der Lichtbogen wird zur Laserwirkzone fokussiert. Es kommt zu einem kontinuierlichen Nahtverlauf.

2. Es kann gezeigt werden, dass der messbare Einfluss der Temperatur auf die Spannungsänderung bei der jeweiligen Legierung erst ab einer definierten Temperatur zu beobachten ist. Dabei variiert die Temperatur für unterschiedliche Legierungen. Die kritische Temperatur wird durch die Oxidschichtzusammensetzung bestimmt. Somit können Legierungen mit MgO-Schichten bereits bei laserinduzierten Temperaturerhöhungen von 40 K zu Rissen neigen. Diese Temperatur kann ebenfalls durch Temperaturmessungen bei unterschiedlichen Laserleistungen bestimmt werden.

3. Der Effekt kann auch durch die Betrachtung bei unterschiedlichen Elektrodenpolungen sichergestellt werden. Es zeigt sich, dass die Spannung bei negativer Elektrodenpolung deutlich stärker beeinflusst wird und mit zunehmender Laserleistung bzw. Oberflächentemperatur sich der Spannung einer positiv gepolten Elektrode und damit einer gereinigten Aluminiumoberfläche annähert.

4. Es konnte ein nicht-thermischer Modellversuch zeigen, dass durch eine mechanische Krafteinwirkung eine stabilisierende Wirkung erzielt werden kann. Dies lässt den Schluss

zu, dass der Lichtbogen während der Krafteinwirkung bessere Bedingungen hatte. Dies kann auf ein lokales Aufbrechen der Oxidschicht unterhalb des Lichtbogens hindeuten.

5. Die kritischen Temperaturen können berechnet werden und weichen weniger als 5 % vom experimentell ermittelten Wert ab. Dies ist durch den einfachen Ansatz der thermisch induzierten Spannung möglich. Das sich ausdehnende Aluminium prägt der Oxidschicht eine Dehnung auf, die in einer festigkeitsüberschreitenden Spannung resultiert. Ab einer legierungsspezifischen Temperatur kann es zur Rissbildung in der Oxidschicht kommen.

6. Der Effekt des Aufbrechens einer Oxidschicht wird bei der Bestimmung von Passivierungsschichten durch das Pilling-Bedworth-Verhältnis beschrieben. Dieses besagt, dass die Oxidschicht durch thermische Spannungen abplatzen kann oder ob sich eine passivierende Schicht ausbildet. Ein ähnlicher Effekt wird durch die Erwärmung des Materials erzwungen. Die Abplatzungen dienen dem Lichtbogen als neue Ansatzpunkte und führen dadurch, dass der Laserstrahl sehr lokal erwärmt, zu einer Lichtbogenstabilisierung und damit zur Spannungsabnahme.

Durch diese sechs Methoden kann in dieser Arbeit erstmalig gezeigt werden, dass das lokale, thermisch induzierte Aufbrechen der Oxidschicht einen dominierenden Effekt bei der Beeinflussung des Lichtbogens hat.

Durch die Entwicklung dieses coaxialen Laser-Lichtbogenbearbeitungskopfes können Aluminiumlötverbindungen als potentiell Anwendungsfeld angedacht werden. Die stabilisierende Wirkung des Lasers zeigt sich in einer feineren Oberflächenstruktur und Fügeschwindigkeiten über 1 m/min. Durch den Entfall des Flussmittels ist das Verfahren sehr effizient, da es zur Verkürzung der Prozesskette kommt. Im Vergleich mit anderen Verfahren konnten hohe Geschwindigkeit erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [Ala07] Alaluss, K.; Bürkner, G.: Application of hybrid gas metal-arc technology for welding of modern materials in automobile industry. In: Automotive Circle International (Hrsg.): Proc. 11th German and 8th European Automotive Conference "Joining in Automotive Engineering", Apr. 24 - 25, (2008), Bad Nauheim, Germany, CD-ROM.
- [Alu97] Aluminium-Zentrale (Hrsg.): Aluminium-Taschenbuch, Bd. 3. Aluminium-Verlag, Düsseldorf (1997).
- [Alu99] Dwight, J.: Aluminium Design and Construction, Taylor & Francis, London (1999).
- [And75] Andrews, J.G.; Atthey, D.R.: On the motion of an intensely heated evaporating boundary. In: J. Inst. Maths Applics 15 (1976) 59–72.
- [Ant78] Anto, H. und Sagugawa: Phänomene im Schweißlichtbogen. 6. Auflage, 1978.
- [Ara08] Arai, Y.; Sugimoto, M.; Sugiyama, S.; Ishizaka, K.; Takeda, K.: Cathode spot craters in pulse vacuum arc cleaning of a metal surface oxide layer. In: Surface and Coatings Technology, Volume 202, Issues 22-23 (2008) 5293-5297
- [Ard05] Ardenne, M.; Musiol, G.; Klemradt, U.: Effekte der Physik und ihre Anwendungen; 3. Auflage, 2005, 32-34.
- [Asm93] J.R. Davis: Aluminum and aluminum alloys. ASM Speciality Handbook. ASM International 1993.
- [Azo15] AZO Materials, <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=54>, (abgerufen am 13.10.2015)
- [Bec96] Beck, M.: Modellierung des Lasertiefschweißens. Dissertation, Stuttgart, Teubner Verlag, ISBN 3-519-06218-6 (1996)
- [Ber06] Bergmann, J.P.; Goecke, S.-F.; Wilden, J.: Set of a high power diode laser in order to enhance wettability conditions and process speed in a controlled short arc brazing process of zinc coated steels. International Conference on Application of Laser and Electro-Optics, Scottsdale, USA, 2006.
- [Bey84] Beyer, E.: Einfluß des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO₂-Lasern. TU Darmstadt (1984).

- [Bey95] Beyer, E.: Schweißen mit dem Laser, Laser in Technik und Forschung, Hrsg.: Herziger, G. und Weber, H., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995, 34.
- [Bob07] Bobzin, K.; Ernst, F.; Rösing, J.: Plasmalöten von Magnesium- und Aluminiumlegierungen. In: DVS-Berichte Band 243. DVS-Verlag Düsseldorf (2007) 398-401.
- [Bra01] Braumöller, J.: Beitrag zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumwerkstoffen. Dissertation, TU Dresden, 2001
- [Che08] Y. B. Chen, Y. G. Miao, L. Q. Li and L. Wu: Arc characteristics of laser-TIG double-side welding. In: Science and Technology of Welding and Joining 13(5), 2008, 438-444
- [Cul94] Cullison, A.: Two processes together are proving better than one. Welding J., 73, No. 11, 1994, p. 16.
- [Cui91] Cui, H.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten kombinierter Laser-Lichtbogentechnik. Dissertation TU Braunschweig. Braunschweig 1991.
- [Cou97] Coulombe, S.; Meunier, J. L.: Importance of high local cathode spot pressure on the attachment of thermal arcs on cold cathodes. IEEE Transactions on Plasma Science 25(3) (1997) 913-918,
- [Dau95] Dausinger, F.: Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität. Hrsg.: Teubner Verlag Stuttgart 1995.
- [Dem10] Demtröder, W.: Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper. Springer-Verlag, 4. Auflage, 2010.
- [Don12] Donst, D.: Entwicklung eines Zweistrahlverfahrens zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumblechwerkstoffen. Apprimus Verlag, 2012.
- [Dor07] Dorn, L.: Hartlöten und Hochtemperaturlöten. Renningen: Expert Verlag, 2007. ISBN 3-8169-2545-6.
- [Dow89] Dowden, J.; Kapadia, P.D.; Postacioglu, N.: An analysis of the laser-plasma interaction in keyhole welding. In: Appl. Phys., Hrsg.: J. Phys. D. 22 (1989) 741–749.
- [Emd14] B. Emde, M. Huse, J. Hermsdorf, S. Kaierle, V. Wesling, L. Overmeyer, Influence of Welding Current and Focal Position on the Resonant

- Absorption of Laser Radiation in a TIG Welding Arc. *Physics Procedia - LANE* 2014 (56), 646–652 (2014)
- [Fab06] Fabro, R.; Slimani, S.; Coste, F.; Briand, F.; Dlubak, B.; Loisel, G.: Analysis of basic processes inside the keyhole during deep penetration Nd:YAG cw laser welding. In: *Proc. of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2006)*. LIA/USA (2006) paper no. 101
- [Fin90] Finke, B.R.; Kapadia, P.D.; Dowden, J.: A fundamental plasma based model for energy transfer in laser material processing. In: *Appl. Phys.*, Hrsg.: J. Phys. D. 23 (1990) 643–654.
- [Fis87] Fischer, U.: *Taschenbuch Metall*, 36. Neubearbeitete Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel GmbH, Wuppertal, 1987.
- [Fra98] Franz, T.: *Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser unter Wasser*. Hrsg.: BIAS Verlag, Bremen (1998).
- [Goe05] Goecke-S-F.: Energiereduziertes Lichtbogen-Fügeverfahren für wärmeempfindliche Werkstoffe. In: *DVS-Berichte*, Band 237, DVS-Verlag Düsseldorf (2005) 44-48.
- [Goe08] Goecke S. F., Wilden J., Jahn S., Reich S., Fedtke A., Vollertsen F., Thomy C.: Technologiekette zum Produzieren, Reparieren und Recyceln von Produkten in Material-Mix-Bauweise – PROREMIX. In: *DVS-Berichte* Band 250, DVS-Verlag, Düsseldorf (2008) 75 – 78.
- [Goo56] Good, R.H.; Müller, E. W.: Field Emission. In: *Handbuch der Physik*. Band 21. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg (1956) 176-231
- [Gra76] Grauer, R.; Schmoker, P.: Die Oxidation von Aluminium-Magnesium-Legierungen in Sauerstoff bei erhöhter Temperatur. *Werkstoffe und Korrosion* 27, Heft 11 (1976) 169-774
- [Hag83] Haginoya, I.; Fukusako, T.: Oxidation of molten Al-MG alloys. *Transaction of the Japan Institute of Metals* 24 (1983) 613-619.
- [Ham81] Hamasaki, M.: Welding method combining laser welding and tig welding. Claim 56-49195, Japan, Int. Cl. B23K 26/00, 9/00, 20.11.1981.
- [Ham84] Hamasaki, M.: Welding method combining laser welding and MIG welding. Claim 60-66991, Japan, Int. Cl. B23K 26/12, 9/16, 16.04.1984.
- [Has85] Hashiura, M.; Una, T. and Shusuki, S.: Laser working device. Claim 60-106688, Japan, Int. Cl. B23K 26/12, 26/14, 12.06.1985.

- [Hos85] Hoshinouchi, S., Kanaoka, M. and Fukada, A.: Laser working apparatus. Claim 60-216989, Japan, Int. Cl. B23K 26/14, 30.11.85.
- [Hu05] Hu, B.; den Ouden, G.: Laser induced stabilisation of the welding arc. Science and Technology of Welding and joining, Vol 10, 2005, S. 76-81.
- [Hun56] Hunter, M.S.; Fowls, P.: Naturally and thermally formed oxide films on aluminum. Journal of the electrochemical Society. (1956) 482-485.
- [Hüg92] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung. Teubner Verlag Stuttgart (1992).
- [Jac75] Jackson, J. D.: Classical Electrodynamics. Wiley & Sons, New York, 2. Edition, 1975.
- [Jüt75] Jütter, B.; Puchkarov, V. F.; Rohrbeck, W.: Nanosecond field emission. Production and destruction of field emitting micro-tips by cathode flares, Preprint 75-3. Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik (1975)
- [Kah85] Kahl, W.; Fromm, E.: Examination of the strength of oxide skins on aluminum alloy melts. Metallurgical transactions B, Vol 16B, 1985, S. 47-51.
- [Kat08] Katayama, S.: Effect of laser-induced plume on laser beam focusing during remote welding. In: Proc. IIW Com. IV Conference. Graz, Austria (2008) IIW Doc. IV-962-08.
- [Kan85a] Kanehara, Y.: Working head in working device using laser light. Claim 60-154894, Japan, Int. Cl. B23K 26/14, 14.08.1985.
- [Kan85b] Kanaoka, M. and Hoshinouchi, S.: Laser beam working apparatus. Claim 60-234782, Japan, Int. Cl. B23K 26/00, 26/14, 21.11.85
- [Kie72] Kielich, S.: Kerr-effect induced in liquid argon and carbon tetrachloride by fluctuational-statistical processes. Acta Physica Polonica; Vol. A41 (1972), 653-65
- [Kla00] Klassen, M.: Prozeßdynamik und resultierende Prozeßinstabilitäten beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen. Hrsg.: BIAS Verlag Bremen (2000).
- [Kil06] Killing, R.: Mit geringem Wärmeeintrag schnell und sicher verbunden - Übersicht über die energiearmen MSG-Verfahren. In: Der Praktiker, 58 (2006) 2 44-48.

- [Kli07] Kling, R.; Otte, F.; Stahlhut, C.; Hermsdorf, J.: Minimale Laserleistung mit Lasern angepasster Strahleigenschaften für das Laser/MSG-Hybridschweißen in Fertigungssystemen für die Fahrzeugfertigung. In: DVS-Berichte, Band 244. DVS-Verlag, Düsseldorf (2007) 409-418.
- [Klo04] Klocke, F.; Senster, P.: Laserstrahlhartlöten von Aluminiumlegierungen. In: DVS-Berichte, Band 231, DVS-Verlag, Düsseldorf (2004) 228-231.
- [Kro93] Kroos, J.: Stabilität und Dynamik der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen von Metallen. Dissertation TU Braunschweig (1993).
- [Lan86] Lancaster, J. F.: The electric arc in welding. In The physics of welding, 2nd edition, Pergamon Press (1986) 146–227
- [Lan13] Langohr, A; Swider, M; Wulf, E; Möhwald, K; Hassel, T; Maier, H; Möller, F.: Development of flux free filler metals and processes for brazing of aluminum. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionschweißen (LÖT13), DVS-Berichte Band 293, Nr. 3377, ed.: DVS Media GmbH. DVS-Verlag Düsseldorf (2013) 205-211
- [Lee85] Lee, S. T.; Schaefer, D. V.; Lockwood, F. E.: Oxidation of an aluminum – 1.8 % magnesium alloy in dry and moist atmosphere. Aluminium 61, Heft 7 (1985) 504-509.
- [Loh14] Lohrey, M.: Verhalten der Oxidschicht beim Aufheizen und deren Einfluss auf die Lötbarkeit. Dresdner Fügetechnische Berichte, Dresden (2014)
- [Low92] Lowke, J.; Kovitya P.; Schmidt, H. P.: Theory of free-burning arc columns including the influence of the cathode. J. Phys. D: Appl. Physics. 25, 1600-6.
- [Men97] Mennicke, C.: Untersuchung zur Hochtemperaturoxidation von FeCrAl-Legierungen. Dissertation. Stuttgart: Max-Planck-Institut für Materialforschung, 1997.
- [Mer00] Merkel, M.; Thomas K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe, 5. neubearbeitete Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2000.
- [Met10] Metoxit AG. Aluminiumoxidkeramik DIN EN 60 672, Typ C799. Januar 2007, abgerufen am 19. August 2010
- [Möl13] Möller, F; Tang, Z; Langohr, A.: Novel aluminum brazing alloys for laser beam processes. IIW 2013 Annual Assembly Com. XVII, Essen (2013) IIW-Doc. XVII-A-0036-13 (online)

- [Mue95] Müller, W.: Löttechnik – Leitfaden für die Praxis. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 127, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [Ols59] Olsen, H. N.: Thermal and electrical properties of an argon plasma. Phys. Fluids 2; 1959; 614-623.
- [Ono86] Ono, M.: Laser welding method. Claim 61-232079, Japan, int. cl. B23K 26/00, 9/00, 9/16, 16.10.1986.
- [Oma88] Omay, T.: Laser welding method. Claim 63-30193, Japan, Int. cl. B23K 26/00, 9/16, 08.02.1988.
- [Ost07] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [Pau93] Paulini, J.; Simon, G.: A theoretical lower limit for laser power in laser-enhanced arc welding. J. Phys. D: Appl. Physics. 26, 1523-1527.
- [Pet91] Petzold, A.; Ulbricht, J.: Aluminiumoxid: Rohstoff, Werkstoff, Werkstoffkomponente. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig (1991)
- [Pet13] Petzoldt, F.; Schrick, K.; Günther, K.; Bergmann, J.P.: Mechanisiertes Magnesium-MSG-Schweißen mit Laserunterstützung zur Verbesserung des Benetzungsverhaltens. DVS-Berichte 296, (2013), 39-45
- [Pil23] Pilling, N.B.; Bedworth, R. E.: The Oxidation of Metals at High Temperatures. J. Inst. Met 29 (1923), p. 529-591.
- [Rad88] Radaj, D.: Wärmewirkung des Schweißens - Temperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug. Hrsg.: Springer Verlag Berlin (1988).
- [Rei15] Reisgen, U.; Krivtsun, I.; Gerhards, B.; Zabirow, A.: Experimental research of hybrid welding processes in combination of gas tungsten arc with CO₂- or YB-Laser beam. Proc. of 33th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2015). LIA USA (2015) paper no. 704
- [Ros09] Rose, S.; Zähr, J.; Schnick, J.; Füßel, U.; Goecke, S.-F.: Optimierung der Frequenzbalance beim WIG-AC-Schweißen von Aluminium. Konferenz-Beitrag. Fügetechnisches Kolloquium Dresden, März (2009)
- [Rug80] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik, Band II: Verfahren und Fertigung, Kapitel 10.2 „Schmelzschweißen“. Springer Verlag Berlin, 1980

- [Sar10] Sarrafi, R.; Kovacevic, R.: Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc, *Welding Journal* (2010) 1-s-10-s.
- [Sch03] Schwartz, M. M.: *Brazing*, 2. Aufl., ASM International, Materials Park (2003).
- [Sch04] Schulze, G.: *Die Metallurgie des Schweißens*. 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 2004.
- [Sch08] Schnick, M.; Füßel, U.; Fuentes Muñoz, J.; Zschetzsche, J.: Physikalische Beschreibung von Plasmaschweißlichtbögen und deren Wechselwirkungen mit dem Schmelzbad. In: *DVS-Berichte*, Band 250. DVS-Verlag, Düsseldorf (2008) 144-154.
- [Sch09] Schnick, M.; Rose, S.; Füßel, U.; Mahrle, A.; Demuth, C.; Beyer, E.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen einem Plasmalichtbogen und einem Laserstrahl geringer Leistung. In: *DVS-Berichte*, Band 258. DVS-Verlag, Düsseldorf (2009) 16-21.
- [Sch85] Schnellhase, M.: *Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug*. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH Düsseldorf (1985)
- [Sco99] Scotto-Sheriff, S.; Darque-Ceretti, E.; Plassart, G.; Aucouturier, M.: Physico-chemical characterization of native air-formed oxide films on Al-Mg alloys at low temperature. *Journal of material Science*, 34 (1999) 5081-5088.
- [Sei06] Seibold, G.: Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung. *Laser in der Materialbearbeitung. Forschungsberichte des IFSW*, 2006, S.28.
- [Sey02] Seyffarth, P., Krivtsun, I.: *Laser-Arc Processes and Their Applications in Welding and Material Treatment*. In: *Welding and allied Processes*, New York, 2002(1).
- [Shu84] Shugiyama, S.; Nakayama, K. and Shano, N.: Method of welding. Claim 59-232690, Japan, Int. Cl. B23K 31/06, 9/02, 27.12.1984.
- [Ste79a] Steen 79, W.M.: Methods and apparatus for cutting, welding, drilling and surface treating. Pat. No 1547171, GB, Int. Cl. B23K 26/00, 9/00, 06.06.1979.
- [Ste79b] Steen, W.M.; Eboo, M.: Arc augmented laser welding. In: *Metal Construction* 11, No. 7, 1979, pp 332-335

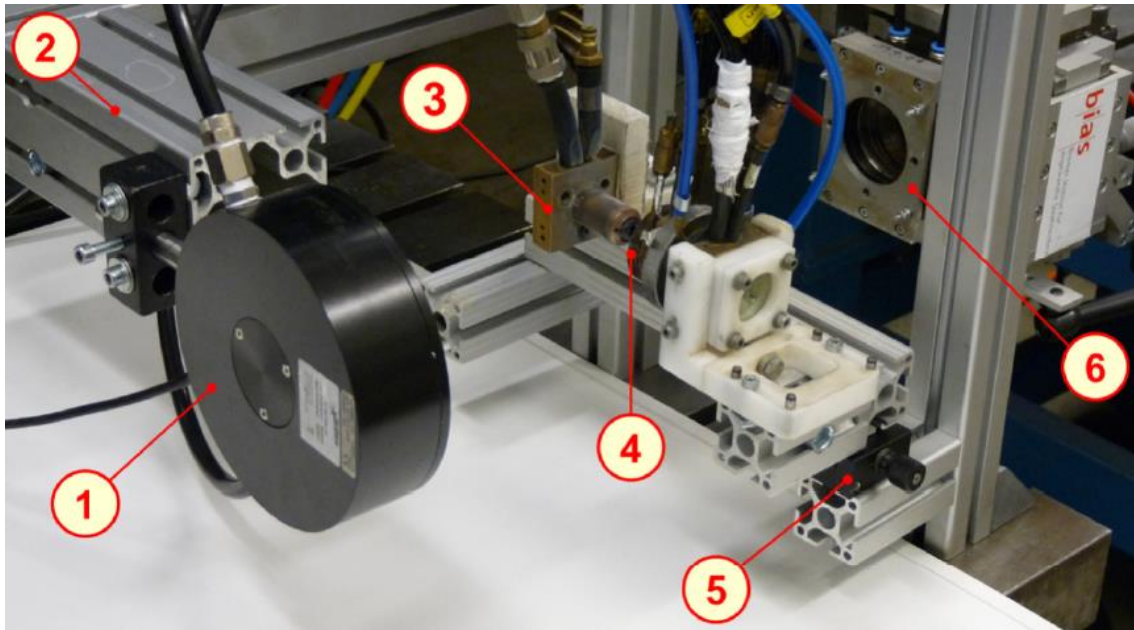
- [Ste80] Steen, W.M.: Arc augmented laser processing of materials. In: Journal of applied physics, 198, 51(11), 5636-5641.
- [Stu07] Stute, U; Kling, R.; Hermsdorf, J.: Interaction between Electrical Arc and Nd:YAG Laser Radiation. Annals of the CIRP Vol.56/1/2007, Hannover (2007), 197-200.
- [Syn04] Syvertsen, M.: Oxide skin strength on molten aluminum. Metallurgical and materials transaction B, Vol. 37B, 2006, S. 495-503.
- [Tho04] Thomy, C.; Schilf, M.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.: Nd:YAG-Laser GMA hybrid welding of aluminium alloys. In: Laser Assisted Net Shape Engineering 4 (4th Lane 2004), eds.: Geiger M.; Otto, A.; Meisenbach Bamberg Vol. 1(2004) 159-168.
- [Tho08] Thomy, C; Möller, F; Sepold, G; Vollertsen, F.: Interaction between laser beam and arc in hybrid welding of dissimilar materials. IIW Com. IV Annual Assembly, Jul. 07-09, 2008, Graz, Austria, IIW Doc. IV-961-08 (CD) and in: Welding in the World 1/2 (2009) 58-66.
- [Ten00] Tenorio, J.A.; Espinosa, D.C.R.: High-temperature oxidation of Al-Mg alloys. In: Oxidation of Metals 53 (2000), S.361-373.
- [Tus96] Tusek, J.: Sinergic operation of welding arc and laser beam for practical application or scientific research only?. Varilna tehnika, Ljubljana, 45, 1996, No 2, pp 39-46.
- [Vol04] Vollertsen, F.; Sepold, G.; Seefeld, T.; Kreimeyer, M.; Wagner, F.: Neue Laserfügeprozesse für Stahl-Aluminium-Mischverbindungen. In: Dilthey, U. (Hrsg.): Proc. Fügen im Fahrzeugbau - 9. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, Shaker-Verlag GmbH, Aachen (2004) 367-376.
- [Vol06] Vollertsen, F.; Seefeld, T.: Aktuelle Entwicklungen und Perspektiven beim Laserstrahlfügen. In: Strahltechnik Band 28, BIAS-Verlag (2006) 1-13.
- [Wal94] Walduck, R.P. and Biffin, J.: Plasma augmented laser welding. Welding and Metal Fabrication, 62, 1994, No. 4, pp 172-176.
- [Wen00] Wendelstorf, J.: Ab initio modelling of thermal plasma gas discharges (electric arcs), Düsseldorf (2000)
- [Wil06] Wilden, J.; Bergmann, J.P.; Goecke, S.: Methoden und Strategien zum flussmittelfreien Fügen von Mischverbindungen durch Kombination der geregelten Lichtbogentechnik und der Lasertechnik. DVS Berichte, Band 240, (2006), 120-125

-
- [Yon89] Yoneda, M. and Katsumura, M.: Laser hybrid processing. J. Jap weld. Soc., 58, No. 6. 1989, pp 427-434.
- [Zäh10] Zähr, J.: Einfluss des Oberflächenzustandes auf das thermische Fügen von Aluminium, Dresdner Fügetechnische Berichte Dresden (2010)

Anhang

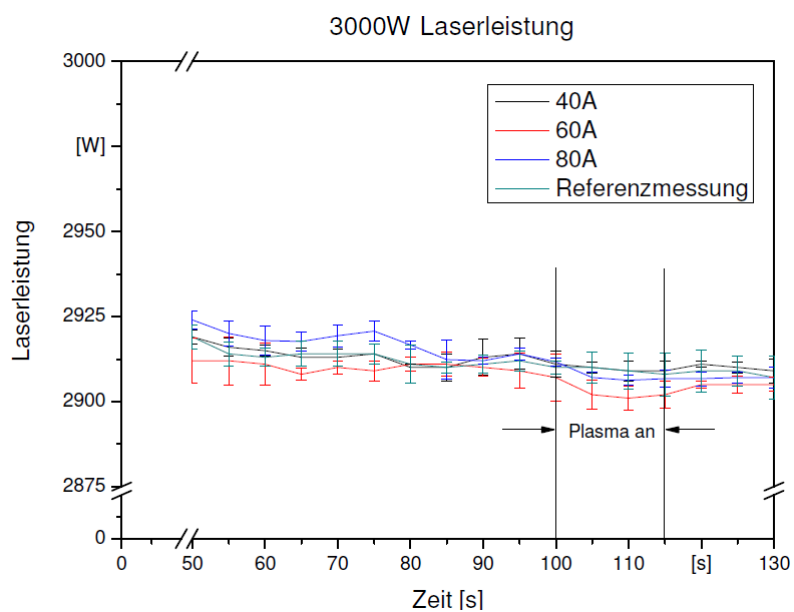
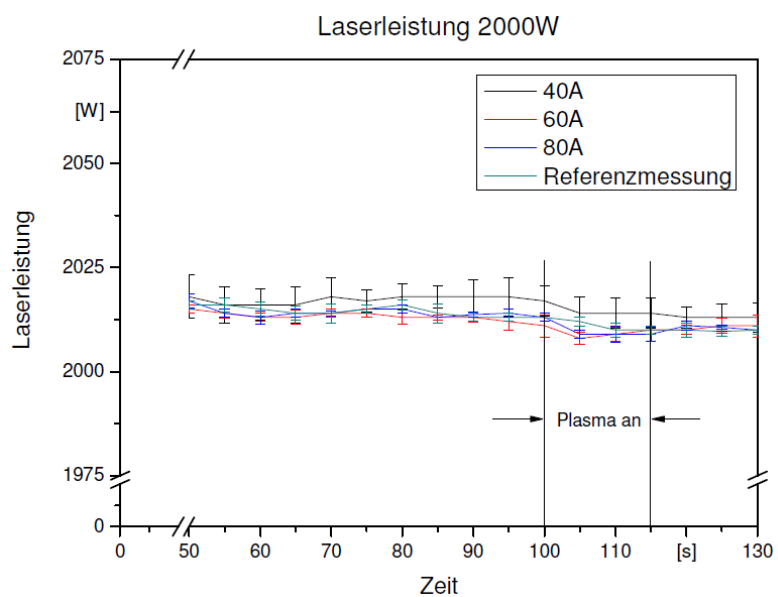
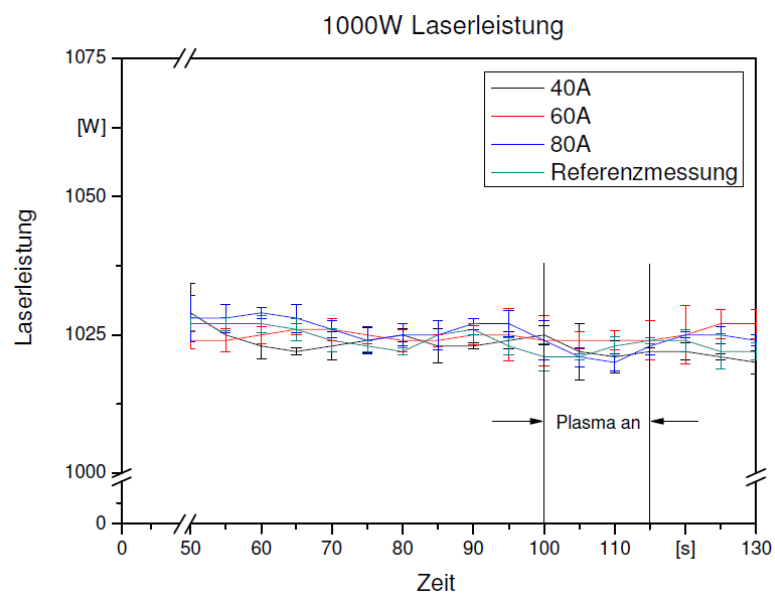
A. Absorptionsmessung der Laserstrahlung im Plasmalichtbogen

In Kapitel 4.6.2 ist der Messaufbau schematisch dargestellt. Im Folgenden wird der umgesetzte Aufbau gezeigt. Zudem wird zu den Messungen eine detailliertere Aufschlüsselung der Absorptionswerte hinzugefügt. Diese dienen nur der Übersicht.



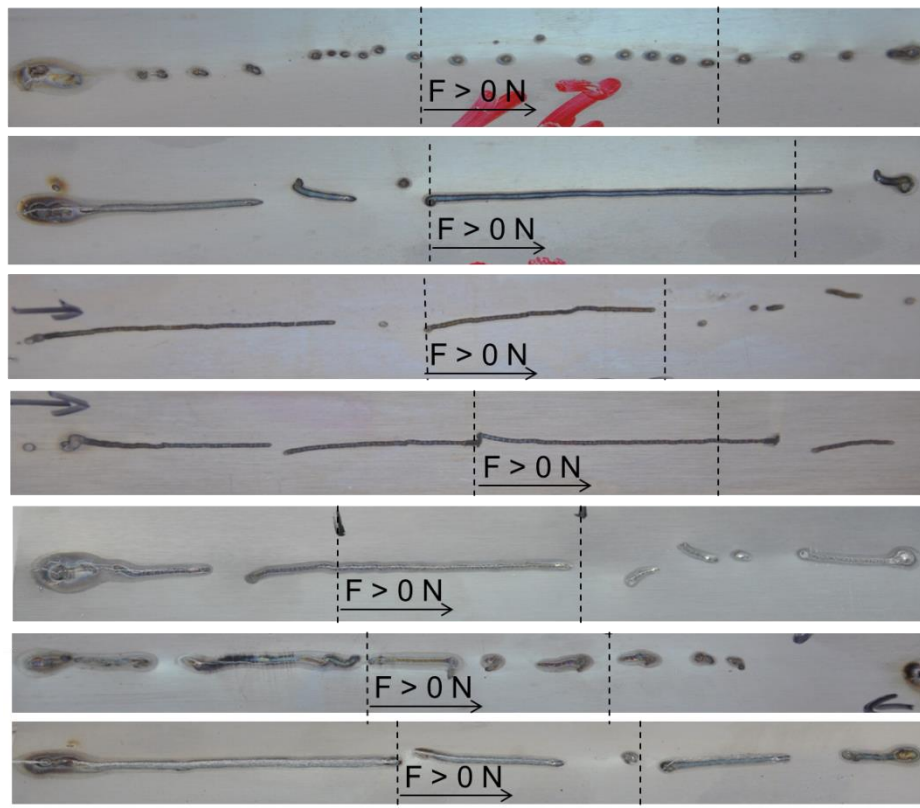
Umgesetzter Aufbau zur Absorptionsmessung im Lichtbogen

Der Hochleistungssensor (1) ist über eine Traverse (2) mit der Optik (6) fest verbunden. Der Ringelektrodenbrenner (4) befindet sich in einer axialen Lage zur Gegenelektrode (3) und orthogonal zum Strahlengang. Das Elektrodenpaar ist an einem einachsigen Verfahrtsch (5) befestigt. Dies ermöglicht eine einfache Zentrierung der Laserfokuslage zwischen den Elektroden. Des Weiteren sind die Messungen der Absorption einzeln dargestellt.



B. Mechanische Bearbeitung

Übersicht der der mechanische belasteten Proben während der Plasmabearbeitung.



Möller 2015

BIAS ID 152402

Fotos der Blechoberflächen nach dem Biegeversuch

Veröffentlichungsliste

Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung und Bezug auf die Arbeit

Möller, F; Thomy, C.: Interaction between laser and plasma arc in hybrid welding of aluminium. Lasers in Manufacturing (LIM 2013). Physics Procedia 41, eds.: C. Emmelmann, M.F. Zaeh, T. Graf, M. Schmidt. Elsevier Amsterdam (2013) 81-89

Langohr, A; Swider, M; Wulf, E; Möhwald, K; Hassel, T; Maier, H; Möller, F.: Development of flux free filler metals and processes for brazing of aluminum. Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionschweißen (LÖT13), DVS-Berichte Band 293, Nr. 3377, ed.: DVS Media GmbH. DVS-Verlag Düsseldorf (2013) 205-211

Thomy, C; Möller, F; Sepold, G; Vollertsen, F.: Interaction between laser beam and arc in hybrid welding of dissimilar materials. IIW Com. IV Annual Assembly, Jul. 07-09, 2008, Graz, Austria, IIW Doc. IV-961-08 (CD) and in: Welding in the World 1/2 (2009) 58-66

Weitere Publikationen des Autors

Swider, M; Langohr, A; Möller, F. Entwicklung flussmittelfreier Lote und Prozesse zum Löten von Aluminiumlegierungen. Schweißen und Schneiden 64/8 (2012) 490-496

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F.: Joining of titanium-aluminium seat tracks for aircraft applications - system technology and joint properties. Welding in the World 56/3-4 (2012) 108-114 also in: IIW Assembly 2010 Com. XVII Istanbul, Turkey (2010) IIW-Doc. XVII-0005-2010 (CD-Rom)

Möller, F; Kügler, H; Kötschau, S; Geier, A; Goecke, S.: Gap bridging ability in laser GMA hybrid welding of thin 22MnB5 sheets. Proc. of the 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2014) Physics Procedia 56, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, M. Merklein. Elsevier Amsterdam (2014) 620-629

Möller, F; Grden, M; Thomy, C; Vollertsen, F.: Combined laser beam welding and brazing process for aluminium - titanium hybrid structures. Lasers in Manufacturing (LIM 2011), eds.: M. Schmidt, F. Zaeh, T. Graf, A. Ostendorf. Elsevier Amsterdam (2011) 215-223

Goecke, S; Hübner, M; Möller, F; Thomy, C.: Joining and Repair of Aluminium-Steel Mixed Joints. 16. International Conference on the Joining of Materials (JOM). Sankt Helene, Tisvildeleje, Denmark (2011), 1-7

Wottschel, V; Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F; Schiebel, P; Herrmann, A; Schimanski, K; Zoch, H.: Novel method for joining CFRP to aluminium. 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, ed. B. Wielage. Eigenverlag Chemnitz, Band 41 (2011) 338-345

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F; Schiebel, P; Hoffmeister, C; Herrmann, A.: Novel method for joining CFRP to aluminium. Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2010), Physics Procedia 5/2, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, M. Geiger. Meisenbach Bamberg (2010) 37-45

Möller, F; Thomy, C.: Laser welding and brazing of dissimilar materials. In: Handbook of laser welding technologies. Ed.: S. Katayama, Woodhead Publishing Cambridge (2013) 255-279

Möller, F; Kügler, H.: Aramidschneiden mittels Laserstrahl. Schweißen und Schneiden 67, 4 (2015) 198

Schultz, V; Möller, F; Vollertsen, F.: Lasertechnik und Umformprozesse. Blech/Rohre/Profile 4 (2014) 28-30

Möller, F; Kügler, H; Reitemeyer, D; Vollertsen, F.: Laserstrahlfügen von Mangan-Bor-Stählen für moderne Leichtbaukonzepte. Schweißen und Schneiden 65/9 (2013) 628-630

Woizeschke, P; Möller, F; Vollertsen, F.: Laserstrahlfügen von CFK- und Aluminiumbauteilen für den Leichtbau von morgen. Laser-Magazin 4 (2012) 6-7

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F.: Flussmittelfreies Hartlöten von Aluminiumlegierungen mit einem coaxialen Laser-Plasma-Hybridlötprozess. Schweißen und Schneiden 62/5 (2010) 294

Kügler, H; Möller, F; Kötschau, S; Goecke, S; Vollertsen, F.: Laser-MSG-Hybridschweißen von pressgehärteten Feinblechen mit reduziertem Wärmeeintrag. GST-Große Schweißtechnische Tagung 2015, DVS-Berichte Bd. 315. DVS Media GmbH Düsseldorf (2015) 55-59

Kügler, H; Möller, F; Goecke, S; Vollertsen, F.: Fatigue strength of hybrid welded 22MnB5 overlap joints. IIW Annual Assembly 2015 Com. XII, Helsinki, Finland (2015) IIW-Doc. XII-2247-15 (online)

Möller, F; Kügler, H; Goecke, S.: Laser-GMA-Hybrid Welding of high strength multi-material joints. Lasers in Manufacturing (LIM15) eds.: T. Graf, C. Emmelmann, L. Overmeyer, F. Vollertsen (2015) o. S.

Kügler, H; Geier, A; Mittelstädt, C; Möller, F; Seefeld, T.: Gap tolerant joining of 22MnB5 steel by laser hybrid welding with beam oscillation and laser brazing with two laser beams. Proc. of 33th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2014). LIA Orlando/USA (2014) paper no. 1201

Gatzen, M; Radel, T; Möller, F; Thomy, C.: Influence of Zinc Coatings for Joining Steel Substrates to Aluminium. IIW Annual Assembly 2014 Com. XVII, Seoul/Korea (2014) paper no. XVIIA-0060-14 (online)

Kügler, H; Möller, F; Kötschau, S; Geier, A; Goecke, S; Vollertsen, F.: Bridgeability of increasing gap in laser GMA hybrid welding of 22MnB5. IIW Annual Assembly 2014 Com. XII, Seoul/Korea (2014) paper no. XII-2169-14 (online)

Vollertsen, F; Möller, F.: Modellierungsmethoden für die Prozesszone beim Laserstrahlschweißen dicker Bleche. 11. Stahl-Symposium, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. Bremen (2014) paper no. 02 (CD)

Möller, F; Mittelstädt, C; Kötschau, S; Thomy, C; Goecke, S; Vollertsen, F.: Effect of process parameters on joint properties in laser GMA hybrid welding of thin-sheet fillet welds on 22MnB5. IIW 2013 Annual Assembly Com. XVII, Essen (2013) IIW-Doc. XII-2129-13; IV-1138-13 (online)

Möller, F; Tang, Z; Langohr, A.: Novel aluminum brazing alloys for laser beam processes. IIW 2013 Annual Assembly Com. XVII, Essen (2013) IIW-Doc. XVII-A-0036-13 (online)

Möller, F; Swider, M; Langohr, A; Hassel, T; Möhwald, K; Bach, F; Vollertsen, F.: Development of brazing solder and processes for flux less joining of aluminum. IIW 2012 Annual Assembly Com. XVII, Denver USA (2012) IIW-Doc. XVII-C-0004-12 (online)

Wottschel, V; Möller, F.: CFRP aluminium structures realized by laser beam brazing. Proc. IIW International Institute of Welding, Com. XVII Intermediate Meeting Portugal (2012) Doc. No. XVII-A-0026-12 (online)

Möller, F.: Fluxless brazing of aluminium with a coaxial laser plasma joining process. Proc. IIW International Institute of Welding, Com. XVII Intermediate Meeting Portugal (2012) Doc. No. XVII-A-0025-12 (online)

Möller, F; Vollertsen, F.: Fluxless brazing of aluminum with a coaxial laser plasma joining process. IIW Annual Assembly 2011 Com. XVII, Chennai, India (2011), paper no. XVII-A-0020-2011 (online)

Thomy, C; Möller, F; Vollertsen, F.: Distortion effects in micro welding with fibre laser. Proc. 29th int. Cong. On Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2010) LIA Publication 613 (CD) paper 301, 85-90

Thomy, C; Möller, F; Vollertsen, F.: Distortion effects in micro welding with single-mode fibre laser. IIW Annual Assembly 2010 Com. IV, Istanbul, Turkey (2010) IIW-Doc. IV-1025-10 (CD-Rom)

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F.: Fügen von Aluminium-Stahl Tailored Blanks mittels eines Laser-Plasma Hybridprozesses. Young Professionals, DVS Landesverband Niedersachsen-Bremen und Hamburg-Schleswig-Holstein (2009) CD-ROM

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F.: Development of a Plasma-Laser Brazing Process for Fluxless Joining of Aluminium to Steel. Proc. IIW International Institute of Welding Com. IV Annual Assembly, Singapore, July 2009, IIW Doc. No. IV-995-09

Möller, F; Thomy, C; Vollertsen, F.: Development of a plasma-laser brazing process for fluxless joining of aluminium to steel. Lasers in Manufacturing (LIM09) eds.: A. Ostendorf, T. Graf, D. Petring, A. Otto, F. Vollertsen. AT-Fachverlag Stuttgart (2009) 83 - 88

Walther, R; Thomy, C; Möller, F; Vollertsen, F.: Thermisches Fügen von Mischverbindungen. 6. Laseranwenderforum (LAF'08), eds.: F. Vollertsen, T. Seefeld. BIAS-Verlag Bremen, Bd. 36, (2008) 37-49

Möller, F; Vollertsen, F.: Laserbasierte Fügeverfahren für Mischverbindungen - Vom Tailored Blank zur Struktur. DGM Fortbildungsseminar Hybride Verbindungen, Bremen (25.04.2012)

Ergebnisse aus studentischen Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

Felix Möller, Diplomarbeit, Entwicklung eines Plasma–Laserschweißkopfes zum flussmittelfreien Fügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen Diplom, 2007

Johann Bergmann, Diplomarbeit, Prozessoptimierung und Analyse eines Plasma-Laser-Hybridprozesses für Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks mittels einer statistischen Parameterstudie, 2008

Felix Möller, Masterarbeit, Untersuchung der Prozesswechselwirkungen zwischen Laserstrahl und Plasmalichtbogen beim Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen, 2009

Mohamed Benmusa, Bachelorarbeit, Untersuchungen zum Fügen von Al/St sowie Al/Ti Tailored Hybrid Blanks im Stumpfstoß mit einem coaxialen Laser-Plasma-Hybridprozess, 2009

Nikolas Meincke, Bachelorarbeit, Untersuchungen zum flussmittelfreien Hartlöten von Aluminiumlegierungen mit einem coaxialen Laser-Plasma-Hybridprozess, 2009

Christoph Mittelstädt, Bachelorarbeit, Bestimmung des Temperaturfeldes beim Laser-Plasma-Hybridlöten, 2011

Tim Radel, Bachelorarbeit, Beitrag zur Reinigungswirkung von Plasmalichtbögen auf Aluminiumwerkstoffen, 2012

Stefan Ladislau, Bachelorarbeit, Bestimmung des plasmainduzierten Einflusses auf den Laserstrahl, 2013

Reihe Strahltechnik im BIAS Verlag

Bisher erschienen:

Herausgegeben von Frank Vollertsen, Ralf Bergmann

Simon Kibben

UV-laserbasierte Oberflächenfluorierung von Polymeren

Strahltechnik Band 58, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-52-8

Michael Schwander

Lokale Diamantsynthese durch einen laserbasierten atmosphärischen CVD-PVD-Prozess

Strahltechnik Band 56, Bremen 2016, ISBN 978-3-933762-50-4

Marius Gatzen

Durchmischung beim Laserstrahl-tiefschweißen unter dem Einfluss niederfrequenter Magnetfelder

Strahltechnik Band 55, Bremen 2015, ISBN 978-3-933762-49-8

Frank Vollertsen, Hendrik Tetzl (Hrsg.)

Thermal Forming and Welding Distortion, Proceedings of the IWOTE'14

Strahltechnik Band 54, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-48-1

Zhuo Tang

Heißrissvermeidung beim Schweißen von Aluminiumlegierungen mit einem Scheibenlaser

Strahltechnik Band 53, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-47-4

Martin Grden

Simulation thermischen Biegens mittels Gebietszerlegung

Strahltechnik Band 52, Bremen 2014, ISBN 978-3-933762-46-7

Jens Sakkiittibutra

Modellierung thermisch bedingter Formänderungen und Eigenspannungen von Stählen zum Aufbau von geregelten Prozessen

Strahltechnik Band 51, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-45-0

Frank Buschenhenke

Prozesskettenübergreifende Verzugsbeherrschung beim Laserstrahlschweißen am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung

Strahltechnik Band 50, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-44-3

Daniel Reitemeyer

Stabilisierung der Fokusslage beim Schweißen mit Faser- und Scheibenlasern

Strahltechnik Band 49, Bremen 2013, ISBN 978-3-933762-43-6

Steffen Neumann

Einflussanalyse beim single mode Faserlaserschweißen zur Vermeidung des Humping-Phänomens

Strahltechnik Band 48, Bremen 2012, ISBN 978-3-933762-42-9

Mostafa Agour

Determination of the complex amplitude of monochromatic light from a set of intensity observations

Strahltechnik Band 47, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-41-2

Andreas Stephen

Elektrochemisches Laser-Jet-Verfahren zur Mikrostrukturierung von Metallen

Strahltechnik Band 46, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-40-5

Michael Koerd

Herstellung von integriert-optischen Sensorstrukturen in Polymersubstraten basierend auf Brechzahländerungen durch ultraviolette Laserstrahlung

Strahltechnik Band 45, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-39-9

Hanna Wielage

Hochgeschwindigkeitsumformen durch laserinduzierte Schockwellen

Strahltechnik Band 44, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-38-2

Claus Thomy

Dynamisches Prozessverhalten beim Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen

Strahltechnik Band 43, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-37-5

Thomas Seefeld

Laser-Randschichtschmelzen mit erhöhter Prozessgeschwindigkeit am Beispiel von Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen

Strahltechnik Band 42, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-36-8

Frank Vollertsen (Hrsg.)

Thermal Forming and Welding Distortion

Strahltechnik Band 41, Bremen 2011, ISBN 978-3-933762-35-1

Frank Vollertsen, Daniel Reitemeyer (Hrsg.)

Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 40, Bremen 2010, ISBN 978-3-933762-34-4

Claas Falldorf

Bestimmung der komplexwertigen Amplitude von Wellenfeldern auf Basis des Prinzips der Selbstreferenz

Strahltechnik Band 39, Bremen 2010, ISBN 978-3-933762-33-7

Marc Baumeister

Dynamische Laser-Mikroperforation mit single-mode Faserlaser

Strahltechnik Band 38, Bremen 2009, ISBN 978-3-933762-31-3

Zhenyu Hu

Analyse des tribologischen Größeneffekts beim Blechumformen
Strahltechnik Band 37, Bremen 2009, ISBN 978-3-933762-30-6
Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Eds.)

Laserbearbeitung: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends
Strahltechnik Band 36, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-28-3

Torsten Baumbach
Untersuchungen zur vergleichenden, digitalen Holografie mit aktiver
Wellenfrontmodifikation
Strahltechnik Band 35, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-27-6

Knut Partes
Hochgeschwindigkeitsbeschichten mit dem Laserstrahl
Strahltechnik Band 34, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-26-9
Hendrik Schulze Niehoff
Entwicklung einer hochdynamischen, zweifachwirkenden Mikroumformpresse
Strahltechnik Band 33, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-25-2

Thorsten Bothe
Grundlegende Untersuchungen zur Formerfassung mit einem neuartigen Prinzip der
Streifenprojektion und Realisierung in einer kompakten 3D-Kamera
Strahltechnik Band 32, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-24-5

F. Vollertsen, J. Sakkiittibutra (Hrsg.)
Thermal Forming and Welding Distortion
Strahltechnik Band 31, Bremen 2008, ISBN 978-3-933762-23-8

Herausgegeben von Frank Vollertsen

Michael Kreimeyer
Verfahrenstechnische Voraussetzungen zur Integration von Aluminium-Stahl-
Mischbauweisen in den Kraftfahrzeugbau
Strahltechnik Band 30, Bremen 2007, ISBN 978-3-933762-20-7

Carsten Wochowski
UV-laser-basierte Erzeugung von planaren, polymeren Bragg-Multiplexer-Strukturen
Strahltechnik Band 29, Bremen 2007, ISBN 978-3-933762-19-1

Herausgegeben von Frank Vollertsen, Werner Jüptner

Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Hrsg.)
Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends
Strahltechnik Band 28, Bremen 2006, ISBN 978-3-933762-18-4

Frank Vollertsen (Hrsg.)

Prozessskalierung

Strahltechnik Band 27, Bremen 2005, ISBN 978-3-933762-17-7

Frank Vollertsen, Thomas Seefeld (Hrsg.)

Thermal Forming

Strahltechnik Band 26, Bremen 2005, ISBN 978-3-933762-16-0

Volker Kebbel

Untersuchung zur Erzeugung und Propagation ultrakurzer optischer Bessel-Impulse

Strahltechnik Band 25, Bremen 2004, ISBN 978-3-933762-15-3

Frank Vollertsen, Ferdinand Hollmann (Ed.)

Process Scaling

Strahltechnik Band 24, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-14-6

Emil Schubert

Untersuchungen zum Leichtbau mit Hilfe lasergestützter Mischbauweise

Strahltechnik Band 23, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-13-9

Christoph von Kopylow

Durchstimmbare Mikrokristall-Laser für die absolute Distanzinterferometrie

Strahltechnik Band 22, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-12-2

Carmen Theiler

Aufbau gradiert Nickelbasis-Chromkarbid-Verbundwerkstoffe durch Laserstrahl-Pulverbeschichten

Strahltechnik Band 21, Bremen 2003, ISBN 978-3-933762-11-5

Herausgegeben von Gerd Sepold, Werner Jüptner

Thomas Kreis (Hrsg.)

Werkzeug Laser – Industrieller Fortschritt durch wissenschaftliche Forschung

Strahltechnik Band 20, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-10-8

Gerd Sepold, Thomas Seefeld (Hrsg.)

Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends

Strahltechnik Band 19, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-09-2

Gerd Sepold, Florian Wagner, Jürgen Tobolski

Kurzzeitmetallurgie

Strahltechnik Band 18, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-08-5 (vergriffen)

Frank Elandalousi

Modellgestützte Detektion und Analyse von Materialfehlern an technischen Objekten nach dem Prinzip „Erkennung durch Synthese“

Strahltechnik Band 17, Bremen 2002, ISBN 978-3-933762-07-8

Ingo Zerner

Prozessstabilisierung und Ergebnisse für das Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen

Strahltechnik Band 16, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-05-4

Daniel Holstein

Ortsaufgelöste Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften
laserstrahlgeschweißter Verbindungen

Strahltechnik Band 15, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-04-7

Bernd Grubert

Untersuchung neuartiger Resonatorkonzepte für koaxiale Wellenleiterlaser

Strahltechnik Band 14, Bremen 2001, ISBN 978-3-933762-03-0

Martin Klassen

Prozessdynamik und resultierende Prozessinstabilitäten beim Laserstrahlschweißen von
Aluminiumlegierungen

Strahltechnik Band 13, Bremen 2000, ISBN 978-3-933762-02-3

Ingo Engler

Verfahrenskombination Laserstrahlschweißen und -richten am Beispiel einer Titan-
Leichtbaustruktur

Strahltechnik Band 12, Bremen 1999, ISBN 978-3-933762-01-6

Ulrike Mieth

Erscheinungsbild von Materialfehlern in holografischen Interferogrammen

Strahltechnik Band 11, Bremen 1998, ISBN 978-3-933762-00-9

Werner Jüptner (Hrsg.)

Laser von der Wissenschaft zur Anwendung

Strahltechnik Band 10, Bremen 1997, ISBN 978-3-9805011-4-9

Peter Andrä

Ein verallgemeinertes Geometriemodell für das Streifenprojektionsverfahren zur
optischen 3D-Koordinatenmessung

Strahltechnik Band 9, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-9-4

Thomas Franz

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser unter Wasser

Strahltechnik Band 8, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-8-7

Sigurd Weise

Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Baustählen

Strahltechnik Band 7, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-7-0

Gerd Sepold, Manfred Geiger (Hrsg.)

Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung 2

Strahltechnik Band 6, Bremen 1998, ISBN 978-3-9805011-6-3

Werner Jüptner, Gerd Sepold (Hrsg.)
Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen
Strahltechnik Band 5, Bremen 1997, ISBN 978-3-9805011-5-6

Carolin Renate Radscheit
Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl
Strahltechnik Band 4, Bremen 1997, ISBN 978-9805011-3-2

Jürgen Breuer
UV-lasergestütztes Vorbehandlungsverfahren zur gezielten Modifizierung der
Oberflächen von Polypropylen
Strahltechnik Band 3, Bremen 1996, ISBN 978-3-9805011-2-5

Bernd Heidenreich
Beitrag zum Laserstrahlbrennschneiden von großen Stahlblechen
Strahltechnik Band 2, Bremen 1995, ISBN 978-3-9805011-1-8

Christian Binroth
Beitrag zur Prozessstabilität beim CO₂-Laserstrahlschweißen von Aluminium mit
Zusatzwerkstoffen
Strahltechnik Band 1, Bremen 1995, ISBN 978-3-9805011-0-1